

Trabajo Fin de Grado

Refrigeración de un procesador
mediante la técnica de ebullición en un
líquido dieléctrico

Cooling of a processor through boiling of
a dielectric liquid

Autor

Victoria Eugenia Englert González

Director

José María Marín Herrero



**ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA**

MEMORIA

Refrigeración de un procesador
mediante la técnica de ebullición en un
líquido dieléctrico

Cooling of a processor through boiling
of a dielectric liquid

Autor: Victoria Eugenia Englert González

Director: José María Marín Herrero

Fecha: Junio 2020

Quiero agradecer enormemente a mi tutor, Jose María Marín, por la paciencia, dedicación, orientación y motivación que me ha brindado durante este tiempo. He tenido mucha suerte de haber tenido un tutor tan implicado con mi trabajo y que contestaba con entusiasmo a todas mis dudas. Terminar este trabajo habría sido más complicado si no hubiese sido por su constante apoyo.

También quiero agradecer a Víctor Viñals, por tomarse el tiempo de introducirme en el mundo de la informática y su ayuda para conseguir equipos durante esta crisis del coronavirus, junto con Carlos Gracia.

Finalmente, gracias a mi familia por todo su apoyo y animarme a seguir adelante.

Quiero dedicar este trabajo a mi abuela, Pilar Granell Gaos, por haber sido una fuente constante de conocimiento e inspiración.

INDICE DE CONTENIDO

1.	OBJETIVOS DEL ESTUDIO	1
2.	INTRODUCCIÓN	2
3.	FLUIDOS DIELECTRICOS	5
4.	DESARROLLO TECNOLÓGICO	7
4.1.	EBULLICIÓN	7
4.1.1.	<i>Flujo crítico de calor (CHF)</i>	9
4.2.	ENFRIAMIENTO BIFÁSICO POR INMERSIÓN EN NOVEC 649	11
4.3.	RASPBERRY PI 4	15
5.	DISEÑO EXPERIMENTAL	17
5.1.	COMPONENTES	17
5.1.1.	<i>Recipiente</i>	17
5.1.2.	<i>Sensores de temperatura</i>	17
5.1.3.	<i>Sensor de presión</i>	18
5.1.4.	<i>Microcontrolador ESP32</i>	18
5.1.5.	<i>Resistencias</i>	18
5.1.5.1.	Resistencias de potencia Bourns 35W	18
5.1.5.2.	Resistencia cerámica	19
5.2.	INFRAESTRUCTURA DE COMUNICACIÓN	19
5.2.1.	<i>Captación de lectura de los sensores</i>	20
5.2.2.	<i>Lenguaje de programación</i>	22
5.3.	ENSAYOS	22
5.3.1.	<i>Ensayo de convección forzada</i>	23
5.3.1.1.	Dos resistencias Bourns en serie	23
5.3.1.2.	Raspberry Pi 4	24
5.3.2.	<i>Ensayo de inmersión bifásica</i>	25
5.3.2.1.	Dos resistencias Bourns en serie	26
5.3.2.2.	Obtención de la curva de ebullición nucleada	27
5.3.2.3.	Raspberry Pi 4	31
5.4.	COMPARACIÓN DE LA REFRIGERACIÓN POR AIRE Y EBULLICIÓN	33
6.	RENTABILIDAD DE LA TÉCNICA	35

		INDICES
6.1.	ANÁLISIS ECONÓMICO	35
6.2.	IMPACTO AMBIENTAL	37
6.3.	OTRAS APLICACIONES	37
7.	CONCLUSIONES	39
BIBLIOGRAFÍA		42

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Coef. de transf.de calor para distintos fluidos y distintos mecanismos de transf. de calor - Adaptado de: (Simmons, 1996)	3
Ilustración 2 Estructura Novec 649 (Information, 2020)	6
Ilustración 3 Curva de ebullición del agua a una atmósfera de presión (Nukiyama) Libro teoría convección bifásica	8
Ilustración 4 Representación esquemática de los procesos de ebullición	9
Ilustración 5 Curva teórica de ebullición del Novec 649	10
Ilustración 6 Sistema bifásico en un cilindro hermético	12
Ilustración 7 Componentes de la Raspberry Pi 4 - Adaptado de (Raspberry Pi 4, 2019).....	15
Ilustración 8 Distribución de la temperatura en la Raspberry Pi 3 B+ (Marín Herrero, 2020)	16
Ilustración 9 Distribución de los pins - Montaje electrónico.....	20
Ilustración 10 Esquema de los procesos de captura y visualización de datos.....	21
Ilustración 11 Visualización de la ventana de Node-RED durante el experimento	22
Ilustración 12 Representación del enfriamiento mediante convección forzada ...	23
Ilustración 13 Valores obtenidos en la prueba de estrés de la Raspberry Pi 4....	24
Ilustración 14 Temperatura de la CPU de la RPi 4 con y sin convección forzada.	25
Ilustración 15 Montaje experimental - Resistencia sumergida en Novec 649	26

Ilustración 16 Valores de temperatura y humedad de la resistencia inmersa en Novec 649	27
Ilustración 17 Demostración fotográfica del proceso de ebullición nucleada	29
Ilustración 18 Temperatura al final del experimento	30
Ilustración 19 Curva de ebullición del Novec 649	31
Ilustración 20 Esquema y montaje experimental - RPi4 sumergida en Novec 649	31
Ilustración 21 Resultados experimento inmersión RPi 4 en Novec 649	32
Ilustración 22 Gráfico temperatura-potencia de enfriamiento por aire y ebullición	33
Ilustración 23 Comparación de la variación de la temperatura en los experimentos realizados con la RPi4.....	34
Ilustración 24 Comparativa del capital inicial necesario para ambos modelos de instalación	35
Ilustración 25 Análisis de comparación inversión Novec vs por aire	36

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Comparación distintos tipos de Novec (Adaptado de 3M)	5
Tabla 2 Propiedades Novec 649 (Todos los valores a 25°C) (3M, Novec , 2017)	6
Tabla 3 Ecuaciones para la estimación de las pérdidas mediante los coeficientes de TC	13
Tabla 4 Resultados de coeficientes de TC	13
Tabla 5 Proceso de ebullición.....	28

1. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

A medida que el mundo tecnológico se va modernizando, los dispositivos electrónicos se van sofisticando cada vez más. Esta tendencia lleva a un aumento importante del flujo de calor generado por la corriente eléctrica y, consecuentemente, conduce a un aumento de la densidad de potencia causando un reto significativo en el control térmico. En muchos dispositivos se ha sobrepasado, o se está cerca de sobrepasar, la capacidad de refrigeración de los sistemas tradicionales mediante aire, radiadores y ventiladores. El enfriamiento por inmersión en un líquido es una nueva técnica prometedora que proporciona una mayor velocidad de transmisión de calor, a la vez que reduce el consumo de la energía necesaria en los centros de datos para su climatización.

Aunque es cierto que estas técnicas ayudan a mitigar algunos de los problemas asociados con el enfriamiento por aire y aporta mejoras en la disipación de calor y en la eficiencia energética, estos sistemas sufren muchas resistencias térmicas por el camino. Los sistemas de inmersión en líquido tienen la ventaja que, al estar directamente en contacto el dispositivo a enfriar y el fluido, tienen menores niveles de resistencias. Esta, entre otras numerosas ventajas, ha aumentado el interés comercial en este tipo de enfriamiento. A pesar de todas las características positivas es cierto que se necesita una gran cantidad de líquido dieléctrico cuyo precio suele ser elevado.

El objetivo del presente trabajo es primordialmente el diseño, construcción y ensayo de una instalación de refrigeración de procesadores mediante la ebullición de un líquido dieléctrico. Durante este proceso también ha sido necesario investigar las características de ebullición nucleada del líquido dieléctrico seleccionado (Novec 649). De antemano se sabe que este proceso proporciona una mayor eficiencia térmica frente al resto de procesos disponibles, pero en este estudio se cuantificará esta mejora, cuyo indicador principal será la temperatura que alcanza el procesador en condiciones de carga elevadas.

2. INTRODUCCIÓN

Se dice que hoy en día estamos en lo mejor de la era de la información donde tenemos, más que nunca, la necesidad de incrementar las infraestructuras de comunicación. El desarrollo de la capacidad de transferir datos da como resultado un mundo altamente intercomunicado en el cual las redes sociales son una gran parte de nuestras vidas y muchas empresas no son capaces de funcionar sin e-commerce. Estas demandas constantes han creado un aumento dramático en el número y el tamaño de los bancos de datos. En los últimos años todos los dispositivos electrónicos han aumentado el número de transistores en un chip; pero llegará un momento en el cual ya no se podrán añadir más debido a la falta de espacio. La distancia de espacio mínima predicha está en 5 nm y actualmente nos encontramos en una de 14 nm, por lo que en los próximos años se llegará a alcanzar este límite. (Iwai, 2009)

Este incremento en el número de transistores provoca un aumento del flujo de calor causando una disminución del rendimiento debido al límite térmico que puede soportar un dispositivo semiconductor. Por este motivo un enfriamiento eficaz es altamente importante para acercarnos al máximo rendimiento de los microprocesadores.

En el caso de los servidores de Centros de Datos, los microprocesadores trabajan bajo altas cargas durante un largo periodo de tiempo y tienden a generar más calor. En estos casos no se puede permitir tener un enfriamiento insuficiente ya que puede ocasionar pérdidas de datos relevantes. Actualmente, la mayoría de estos ordenadores son enfriados mediante tecnologías basadas en el flujo de aire o agua. Estos sistemas de enfriamiento son poco eficientes y requieren unos fuertes costos de operación en sistemas de aire acondicionado para mantener los centros de datos a una temperatura adecuada permitiendo su funcionamiento de manera segura.

Analizando la llamada ley de enfriamiento de Newton (1) se observan las distintas vías por las que podemos llegar a aumentar la disipación de calor.

$$q = h \cdot A \cdot (T_2 - T_1) \quad (1)$$

$$q'' = h \cdot \Delta T \quad (2)$$

El calor disipado de la superficie (q) depende del coeficiente de transmisión de calor (h), el área de la superficie (A), la temperatura de la superficie (T_2) y de la temperatura del ambiente (T_1). Está claro que tanto el área como la temperatura de la superficie no pueden ser modificadas. Disminuyendo la temperatura del ambiente se crearía un mayor gradiente de temperatura que aumentaría el calor disipado, pero hay limitaciones sobre cuánto se puede bajar esta temperatura ambiente y no es una vía económica ya que aumenta los costes de aire acondicionado. Con estas restricciones la única forma de alcanzar valores elevados del flujo de calor es aumentando el coeficiente de transmisión de calor, claramente mostrado en la ecuación (2). Para modificar este valor, no solo se ha de tener en cuenta el fluido con el que se trabaja, sino también el mecanismo de transferencia de calor. En la Ilustración 1 se puede observar que, para un mecanismo de transferencia dado, las técnicas de enfriamiento líquido proporcionan coeficientes de transferencia de calor mayor que el enfriamiento con aire.

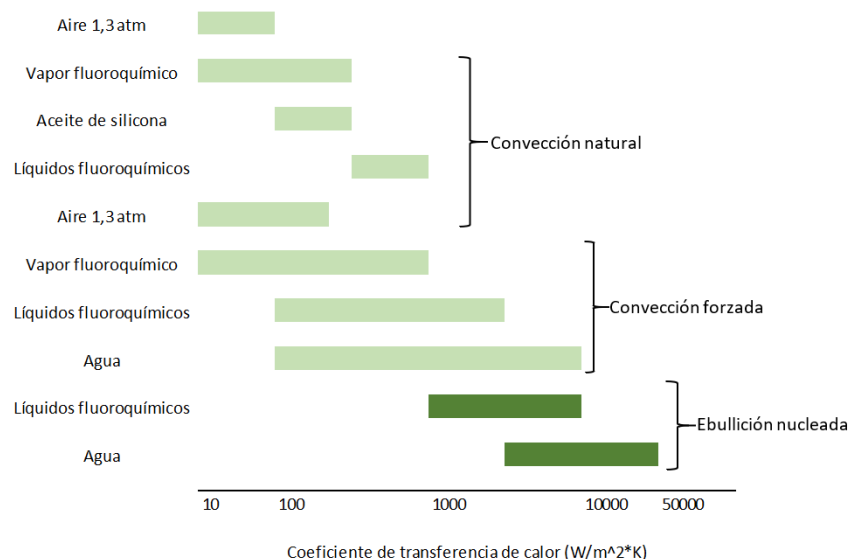


Ilustración 1 Coef. de transf. de calor para distintos fluidos y distintos mecanismos de transf. de calor - Adaptado de: (Simmons, 1996)

En cuanto a la técnica de enfriamiento con líquido, se puede llevar a cabo mediante convección forzada o enfriamiento líquido por inmersión. La convección forzada del agua a través de placas frías proporcionaría gran parte de los requisitos del calor a disipar, pero la ruta de transferencia de calor desde la unión al fluido tiene varias resistencias térmicas (como las de contacto y disipación al exterior) que disminuyen el coeficiente de transferencia de calor global del sistema. Contrariamente, el enfriamiento líquido por inmersión tiene rutas más simplificadas con menos resistencias resultando en mayores coeficientes. El enfriamiento bifásico por inmersión en un líquido tiene la ventaja de que

existe contacto directo entre el equipo y el refrigerante, minimizando la resistencia térmica. También cabe notar que utiliza calor latente de vaporización para extraer mayores cantidades de calor de la superficie. El fenómeno presente en este proceso es el de ebullición nucleada, ofreciendo la clara ventaja de mantener la temperatura del líquido prácticamente constante debido al cambio de fase. En el apartado 1 de los Anexos se encuentra más información sobre la necesidad de un buen enfriamiento.

Esquemáticamente, en el presente estudio, la técnica se basa en la inmersión de un chip en un líquido dieléctrico. Este chip se encuentra a una temperatura superior a la de ebullición del líquido, causando que el líquido en contacto con la superficie cambie de fase de líquido a vapor bajo condiciones de ebullición nucleada. Las burbujas en la superficie crecen, se desprenden y suben hacia la superficie del líquido. Cuando el vapor llega a la tapa del recipiente, que actúa como un condensador, se enfría y condensa de nuevo.

3. FLUIDOS DIELECTRICOS

Los fluidos dieléctricos son utilizados como aislantes eléctricos en una gran variedad de aplicaciones desde transformadores a sistemas micro electrónicos. Estos tienen una alta rigidez dieléctrica, estabilidad térmica, no toxicidad, no son inflamables y son "eco-friendly". (3M, Heat transfer fluids brochure, 2017)

Hay dos grupos principales de fluidos dieléctricos: agua desionizada y los fluidos dieléctricos basados en compuestos hidrocarbonados (aceites dieléctricos) como el aceite mineral o aceite de silicona. (Uhlmann, Röhner, & Langmack, 2010)

No obstante, las compañías intentan desarrollar fluidos dieléctricos con un mayor rango de aplicaciones aumentando, por ejemplo, la capacidad calorífica del fluido mientras se disminuye su impacto ambiental. Los más famosos pertenecen a la familia de 3M Fluidos Novec Inteligentes cuyos puntos de ebullición están entre 34°C a 175°C y los de congelación entre -38°C a -138°C.

Tabla 1 Comparación distintos tipos de Novec (Adaptado de 3M)

	Novec 649	Novec 7000	Novec 1230
Punto ebullición (°C)	49	34	49.2
Punto de escurrimiento (°C)	-108	-122	-108
Peso molecular (g/mol)	316	200	316.04
Temperatura crítica (°C)	169	165	168.7
GWP	<1	530	<1

*GWP: Potencial de contribución al calentamiento global

Debido a las condiciones del proyecto se escogerá el Novec 649 ya que presenta mejores características térmicas. Cabe notar que el Novec 1230 es prácticamente el mismo compuesto que el Novec 649 pero el 1230 es utilizado en el área de protección contra incendios mientras que el 649 está especialmente diseñado para aplicaciones de transferencia de calor. (Gorbounov, Battistin, & Thomas, 2016)

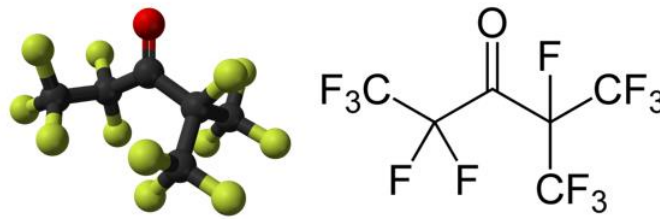


Ilustración 2 Estructura Novec 649 (Information, 2020)

En la Ilustración 2 se muestra la estructura molecular del Novec 649 ($C_6F_{12}O$), y a continuación, en la Tabla 2, se muestran algunas de sus propiedades físicas y térmicas.

Tabla 2 Propiedades Novec 649 (Todos los valores a $25^{\circ}C$) (3M, Novec, 2017)

Novec 649	
Punto ebullición ($^{\circ}C$)	49
Peso molecular (g/mol)	316
Calor de vaporización (kJ/kg)	88
Densidad de líquido (kg/m^3)	1600
Viscosidad cinemática (cSt)	0.40
Viscosidad dinámica (cP)	0.64
Calor específico (J/kg·K)	1103
Tensión superficial (mN/m)	10.8
Prandtl	9.483
Conductividad térmica (W/m·K)	0.059
Rango de rigidez dieléctrica (kV)	>40
GWP	<1

Observando las propiedades se confirma que el Novec 649 tiene un rango de rigidez alto, por lo que tiene una buena capacidad como aislante eléctrico y su GWP por debajo de 1 se posiciona con los más bajos de cualquier compuesto desarrollado. Esta combinación de propiedades térmicas y dieléctricas hacen que el fluido seleccionado sea idóneo para sistemas de transferencia de calor.

4. DESARROLLO TECNOLÓGICO

4.1. EBULLICIÓN

Para poder comprender el mecanismo y el sentido físico detrás de los sistemas de enfriamiento por inmersión es necesario conocer los fundamentos del proceso y los factores que contribuyen a su eficiencia.

Este proceso es utilizado en una amplia cantidad de sistemas de ingeniería como en los intercambiadores de carcasa y tubo, en algunos sistemas de seguridad de reactores nucleares y, como en el caso de este trabajo, en el enfriamiento por inmersión de componentes eléctricos. La ebullición, como se ha mencionado anteriormente, es un fenómeno complicado que no tiene un modelo teórico simple sino varias correlaciones experimentales, siendo la más conocida la debida a Rohsenow.

Aunque las primeras observaciones científicas del fenómeno de ebullición se remontan al año 1756 y fueron hechas por Leidenfrost, es en el año 1934 cuando Nukiyama obtiene la primera curva cuantitativa sobre este fenómeno. Para ello utilizó un cable horizontal metálico que desempeñaba el doble papel de calefactor y de termómetro de resistencia a través del cual midió el flujo de calor (q'') y el exceso de temperatura en la superficie (ΔT_e), obteniendo la famosa curva que se muestra en la Ilustración 3. En ella se muestran tres zonas, de las cuales, en la práctica interesa operar siempre en la primera de ellas, denominada de ebullición nucleada porque se traduce en la formación de burbujas en torno a puntos de nucleación, donde se obtienen los máximos valores del coeficiente de convección a la vez que se sitúa fuera de zonas de riesgo para la pared sólida.

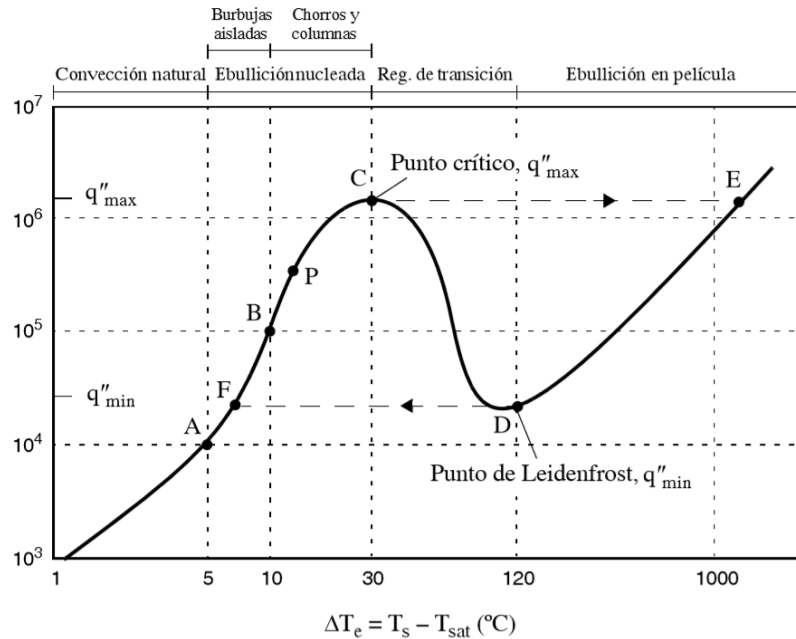


Ilustración 3 Curva de ebullición del agua a una atmósfera de presión (Nukiyama) Libro teoría convección bifásica

Como se puede observar en la curva de ebullición, no hay una relación lineal entre el flujo de calor en la superficie y el exceso de temperatura, ΔT_e , definido como la diferencia de temperaturas entre la superficie caliente y la temperatura de saturación del líquido. En nuestro caso, se trabajará con un recipiente que no estará herméticamente cerrado por lo que reinará la presión atmosférica y la temperatura de saturación será la temperatura de ebullición normal del fluido elegido. En el caso del agua hirviendo, Ilustración 3, se puede comprobar la eficiencia térmica de este mecanismo a través del cociente entre q'' y ΔT_e en el punto de inflexión B que corresponderá a un coeficiente convectivo local de unos $10 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, mucho mayor que en convección monofásica.

Debe tenerse especial precaución con la forma de recorrer la curva de ebullición. Si la variable controlante del ensayo es el flujo de calor, en el punto C se pasa abruptamente de un régimen de ebullición nucleada a otro de ebullición en película, con un salto brusco de la temperatura de la superficie que, en el caso particular del agua, es de aproximadamente unos 1000°C , lo suficientemente alta como para destruir o derretir la superficie. Aquí es donde aparece y cobra importancia el concepto de punto crítico, límite a no superar por los sistemas electrónicos.

En la Ilustración 4 se muestra un pequeño detalle de los fenómenos superficiales en cada zona de la curva.

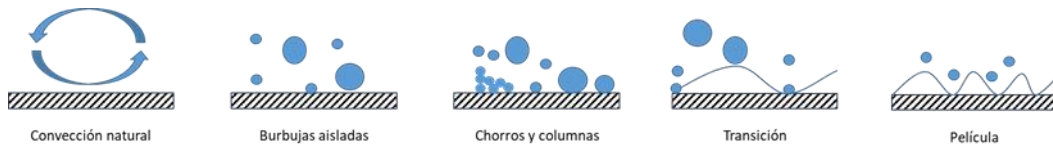


Ilustración 4 Representación esquemática de los procesos de ebullición

Debido a los motivos mencionados, los ensayos deben mantenerse dentro de la curva de ebullición nucleada y a una distancia prudencial del punto crítico. Las expresiones que se necesitan para ello están expuestas a continuación.

4.1.1. Flujo crítico de calor (CHF)

Para poder asegurar que durante el proceso de enfriamiento no pasemos de la región de ebullición nucleada, resulta primordial calcular el flujo crítico de calor (CHF) del Novec 649. La expresión del cálculo del flujo crítico fue predicha inicialmente por Zuber pero con el paso del tiempo se ha ido modificando y adaptando para diversas geometrías por otros investigadores. En la ecuación (3) se muestra la adaptación por Lienhard para el cálculo del calor crítico donde, teniendo en cuenta que se trabaja con una placa plana, $F(L')=1.14$ y el resto de las propiedades del fluido están expuestas en la Tabla 2 obteniéndose: (Marín, Monné, & Uche, 2007)

$$q''_{max} = F(L') \cdot \frac{\pi}{24} \cdot \rho_v^{1/2} \cdot h_{lg} [\sigma \cdot g(\rho_l - \rho_v)]^{1/4} = 172.47 \text{ kW/m}^2 = 17.25 \text{ W/cm}^2 \quad (3)$$

Sabiendo el valor del calor crítico (q''_{max}) se procede a calcular el valor de su temperatura correspondiente mediante la correlación de Rohsenow (4) que es la más recomendada para el cálculo del calor disipado en la ebullición.

$$q''_s = \mu_l \cdot h_{lg} \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma_l} \right]^{1/2} \left(\frac{C_{pl} \cdot \Delta T_e}{C_{sf} \cdot h_{lg} \cdot Pr_l^k} \right)^3 \rightarrow \Delta T_e = 38.76 \text{ °C} \quad (4)$$

Donde $C_{sf} = 0.007$ y $k = 1.7$, valores obtenidos mediante tablas bibliográficas. (Chandrasekaran, 2017). El resto de parámetros que aparecen en la ecuación, cuyos valores se encuentran en la Tabla 2, corresponden a: q''_s es el flujo de calor por unidad de área, μ_l es la viscosidad dinámica de la fase líquida, h_{lg} es el calor latente de

vaporización, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ (el valor de la aceleración de la gravedad), ρ_l es la densidad correspondiente al estado líquido, ρ_g es la densidad correspondiente al estado gas, σ_l es la tensión superficial, C_{pl} es el calor específico de la fase líquida, $\Delta T_e = T_{sat} - T_s$ y Pr_l es el número de Prandtl de la fase líquida.

Sustituyendo el valor obtenido de q''_{max} en la ecuación (4), correspondiente a la correlación de Rosehnow, y despejando el valor de ΔT_e , se obtiene que $\Delta T_e = 38.76 \text{ °C}$ y, consecuentemente, $T_s = \Delta T_e + T_{sat} \rightarrow T_s = 87.76 \text{ °C}$.

Seguidamente se dibujó la curva q''_s frente ΔT_e con el programa EES, Ilustración 5. Esta curva será comprobada experimentalmente más adelante.

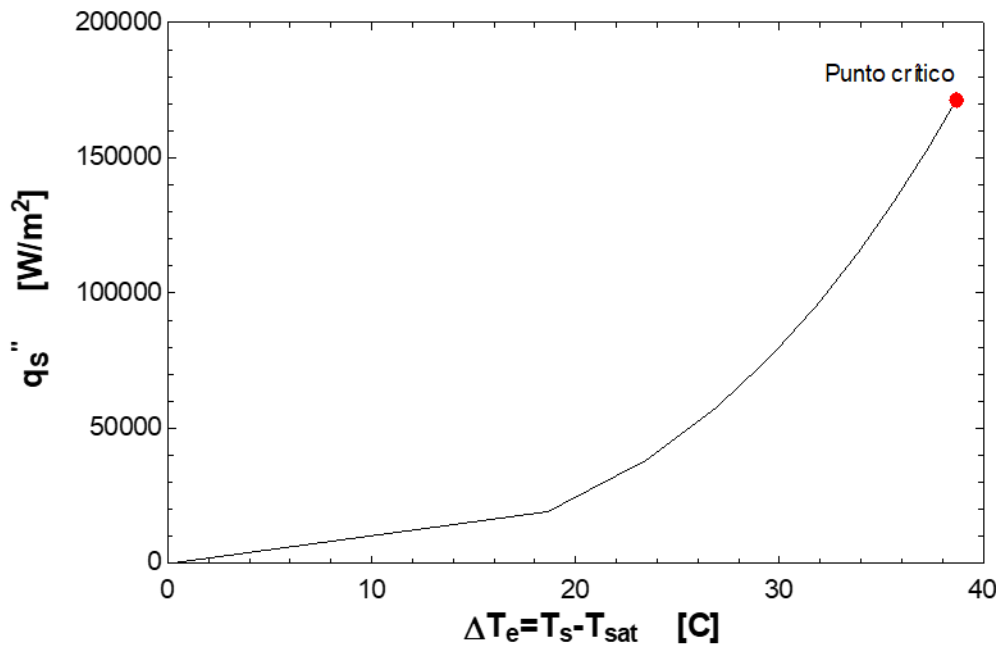


Ilustración 5 Curva teórica de ebullición del Novec 649

También se puede calcular el diámetro de la burbuja mediante la ecuación (5).

$$D_{burbuja} = g \cdot \left(\frac{\rho_l - \rho_g}{\sigma} \right)^{1/2} = 0.8516 \text{ mm} \quad (5)$$

En los experimentos realizados posteriormente, se comprobó que el diámetro calculado de las burbujas concordaba con el tamaño observado.

4.2. ENFRIAMIENTO BIFÁSICO POR INMERSIÓN EN NOVEC 649

El método de enfriamiento por inmersión en líquido dieléctrico se puede llevar a cabo en una fase o en dos fases. En este Trabajo de Fin de Grado se considera la refrigeración bifásica, para obtener mayor eficiencia en la refrigeración.

El Novec 649, el líquido dieléctrico escogido, hierve a los 49°C y por lo tanto condensa por debajo de esta temperatura. Ya que el líquido dieléctrico cambia a vapor, es primordial que el experimento sea realizado en un recipiente cerrado para minimizar las pérdidas del Novec 649.

Aunque el objetivo final de este TFG es estudiar las posibilidades del Novec como agente refrigerante de los procesadores de alto consumo, como los servidores de los Centros de Datos, las dificultades inherentes a la inmersión de un servidor real para los ensayos, llevó a sustituirlos por unos focos de calor cuyo efecto térmico fuera similar, pero con un montaje mucho más simple. Para ello se buscaron y adquirieron unas resistencias eléctricas que generaran un flujo de calor equivalente. Para completar los ensayos con un ordenador de verdad se ensayó con una Raspberry Pi 4.

En la Ilustración 6 se muestra un esquema de la instalación. Tanto la resistencia como la RPi4 (rectángulo negro) se encuentran inmersos en el Novec 649, representado en azul claro. A medida que se calienta el dispositivo, se van creando burbujas de vapor del Novec sobre su superficie que fluyen hacia la interfase Novec-aire. Al principio son muy pequeñas y se van disolviendo en el líquido de nuevo, pero con el aumento de la temperatura de la superficie del dispositivo las burbujas van subiendo con mayor fuerza y tamaño hasta llegar a la interfase y el Novec se evapora. Debido al gradiente de densidad entre el Novec evaporado y el aire, el vapor alcanza la tapa del recipiente donde se condensa debido al gradiente de temperatura entre el interior de la tapa y el exterior, que se encuentra inicialmente a temperatura ambiental.

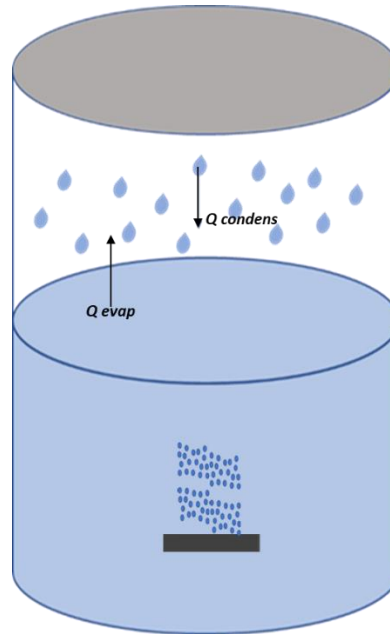


Ilustración 6 Sistema bifásico en un cilindro hermético

En la instalación a escala diseñada para la realización de los ensayos, se mantienen los flujos de calor, pero el calor total generado es muy inferior al de un servidor. Debido a la duración de los experimentos y a un menor calor generado, no se sufren grandes pérdidas de calor en el ensayo experimental y, consecuentemente, no fue necesaria la utilización de un condensador en la tapa.

No obstante, al trabajar a escala real en un futuro, sí sería conveniente determinar las pérdidas de calor entre el sistema y el exterior. A continuación, se han calculado las pérdidas para el recipiente cilíndrico del ensayo; cabe notar que estos valores variarían dependiendo de la geometría y de las propiedades del envase utilizado. A través de la pared del recipiente, tienen lugar los 3 mecanismos de transmisión de calor: la convección natural, la conducción y la radiación. En la Tabla 3 se presentan las ecuaciones utilizadas para el cálculo de cada uno de ellos. Desde la interfase Novec-aire, el Novec_(v) asciende hacia la tapa ubicada en la parte superior del recipiente debido al gradiente de densidad y desplazando el aire presente como se demostrará durante los ensayos. Este calor es el restante del calor disipado inicial menos lo que se ha perdido a través de la pared lateral (Q_s'').

El recipiente de vidrio es cilíndrico pero debido a que el espesor de la capa límite es mucho más pequeño que el diámetro ($\delta/D \ll 1$) se pueden suponer las paredes como planas y verticales.

$$\delta = 0.0014 Ra^{0.24} = 0.43 \rightarrow \delta/D = 0.43/11 = 0.039 \ll 1$$

Se llenará el recipiente con la menor cantidad de Novec posible cubriendo suficientemente el dispositivo, 3 cm (ΔZ_{Novec}), para minimizar el tiempo de calentamiento de la masa líquida del aceite.

Tabla 3 Ecuaciones para la estimación de las pérdidas mediante los coeficientes de TC

C.N en el exterior de la pared	Radiación exterior	Conductividad pared	C.N en el interior de la pared
$h_{ext} = \frac{Nu_{ext} \cdot \lambda_{aire}}{\Delta Z_{Novec}}$	$h_{rad} = \epsilon_{efectiva} \cdot \sigma \cdot (T_C + T_F) \cdot (T_C^2 + T_F^2)$	$h_{cond} = \frac{\lambda_{vidrio}}{e_{vidrio}}$	$h_{int} = \frac{Nu_{int} \cdot \lambda_{Novec}}{\Delta Z_{Novec}}$
$Nu_{ext} = 0.54 \cdot Ra_{ext}^{0.25}$			$Nu_{int} = 0.6 \cdot Ra_{int}^{0.2}$
$Ra_{ext} = \frac{g \cdot \alpha_{c,aire} \cdot (T_{pared} - T_{amb}) \cdot \Delta Z_{Novec}^3}{\nu_{aire} \cdot \alpha_{aire}}$		$\lambda_{vidrio} = 0.8$ $e_{vidrio} = 1 \text{ mm}$	$Ra_{int} = Gr_{int} \cdot Pr_l$
			$Gr_{int} = \frac{g \cdot \beta \cdot q_s^* \cdot \Delta Z_{Novec}^4}{\lambda_{Novec} \cdot \nu_{Novec}^2}$

Para las ecuaciones anteriores se obtienen los siguientes resultados (Tabla 4) donde se observa que $h_{int} \gg h_{ext}$ por lo que la convección en el exterior ofrece mayor resistencia convirtiéndola en el mecanismo controlante y las pérdidas se pueden calcular con suficiente precisión con la siguiente expresión:

$$Q_s'' = q_{conv} + q_{rad} = (h_{ext} + h_{rad}) \cdot (T_C - T_F), \text{ donde } T_C = T_{sat} \text{ y } T_F = T_{amb}.$$

Tabla 4 Resultados de coeficientes de TC

h_{ext}	$7.23 \text{ W/m}^2 \cdot K$
h_{rad}	$6.09 \text{ W/m}^2 \cdot K$
$h_{cond} \equiv \lambda_v/e_p$	$800 \text{ W/m}^2 \cdot K$
h_{int}	$105.9 \text{ W/m}^2 \cdot K$
Q_s''	319.7 W/m^2

Siendo λ_v la conductividad térmica del vidrio y e_p el espesor del recipiente.

Como el foco de calor que se emplea es de pequeñas dimensiones, la ebullición es local y la mayoría de las burbujas se colapsan en el seno del Novec que se va calentando de forma progresiva. Cuando toda la masa de la fase líquida alcanza la temperatura de ebullición se llega a una situación estacionaria y en ese momento la pérdida total de calor del Novec al ambiente por la pared lateral, ecuación (6), tiene un valor de:

$$Q_{p\acute{e}rdidas} = Q_s'' \cdot \pi \cdot D \cdot \Delta z_{novec} = 3.314 \text{ W} \quad (6)$$

El calor restante llegará a la tapa de acero inoxidable del recipiente, donde será condensado y recirculado. La cantidad de calor que será capaz de disipar la tapa al exterior mediante convección, siguiendo la ecuación (9), es 78.44 W/m^2 . Para la realización de este cálculo se obtuvo el valor del coeficiente de convección en la tapa a partir del número de Nusselt en una placa horizontal con el foco frío en la parte superior (8) calculado a partir del número de Prandtl y Grashof (7), donde en este último $L = 0.9D$ ya que la tapa es un círculo de diámetro D .

$$Pr = 0.7 \rightarrow Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_{sup} - T_{\infty}) \cdot L^3}{\nu^2} = 9825014.2 \quad (7)$$

$$Ra = Gr \cdot Pr = 6.88 \cdot 10^6 \rightarrow Nu = 0.27 \cdot Ra^{0.25} = 13.827 \rightarrow h_{tapa} = \frac{Nu \cdot k}{L} = 3.27 \text{ W/m}^2 \cdot K \quad (8)$$

$$\dot{Q}_{conv,tapa} = h_{tapa} \cdot (T_{sat} - T_{amb}) = 78.44 \text{ W/m}^2 \rightarrow Q_{conv,tapa} = 0.75 \text{ W} \quad (9)$$

Como se puede observar, la cantidad de calor que es capaz de disipar la tapa hacia el medio externo mediante convección natural es muy baja. Esto indica que, una vez la totalidad de la masa de Novec 649 líquido alcance la temperatura de saturación, será necesaria la presencia de un condensador en la tapa para poder retirar el calor adecuadamente. Sin embargo, como ya se ha comentado anteriormente para el caso de estos experimentos no se requiere un condensador; al tener ebullición local las burbujas formadas se colapsan en el propio seno del fluido y la duración de los experimentos no es suficientemente alta como para llegar a estas condiciones.

4.3. RASPBERRY PI 4

Después del ensayo con las resistencias, se hará una prueba térmica con la Raspberry Pi 4 para comparar la diferencia entre la refrigeración con aire y con el Novec en el único ordenador que cabe en el recipiente de ensayos.

La Raspberry Pi (RPi) es un ordenador económico de una sola placa (*single board computer*) permite a estudiantes y aficionados a la electrónica diseñar circuitos y controlar otros dispositivos como IoT (*Internet of things*). (El esquema con sus dimensiones se encuentra en el apartado 2 de Anexos).

La mayor ventaja que ofrece es la eficiencia puesto que tiene una altísima capacidad de cálculo con un consumo eléctrico muy bajo, característica que resulta interesante para llevar a cabo el experimento.

Con el procesador *1.5 GHz 64-bit quad-core ARM Cortex-A72* y con una fuente de alimentación de 5V y 3A, la Raspberry Pi 4 Modelo B (85x58x20mm) es la última versión disponible ofreciendo mayor velocidad y capacidad que sus antecesores. (RaspberryPi, 2019)



Ilustración 7 Componentes de la Raspberry Pi 4 - Adaptado de (Raspberry Pi 4, 2019)

La Raspberry Pi utiliza SoC (del inglés System on Chip) que engloba al procesador de cuatro núcleos, la tarjeta gráfica (GPU) y la memoria RAM de 4GB. Al tener todos estos componentes concentrados dentro del SoC, se asegura que prácticamente todo el consumo eléctrico de la Raspberry se realiza dentro de este chip, existiendo un foco de calor localizado cuyo calor es disipado mediante dos vías: una pequeña parte se disipa a través de la cara superior y la mayoría va a circular por las pistas de cobre que

atraviesan la placa de circuito impreso (PCB) para ser cedido finalmente al ambiente por sus dos caras, se podría decir que la PCB se comporta como una aleta bidimensional (ya que el espesor es pequeño, por lo que prácticamente no opone resistencia) cuya base son las conexiones eléctricas al SoC y su punta en los bordes exteriores que se pueden considerar adiabáticos. (Marín Herrero, 2020)

En la Ilustración 8 se comprueba que efectivamente toda la placa está disipando calor, ya que se encuentra a una temperatura superior a la del ambiente.

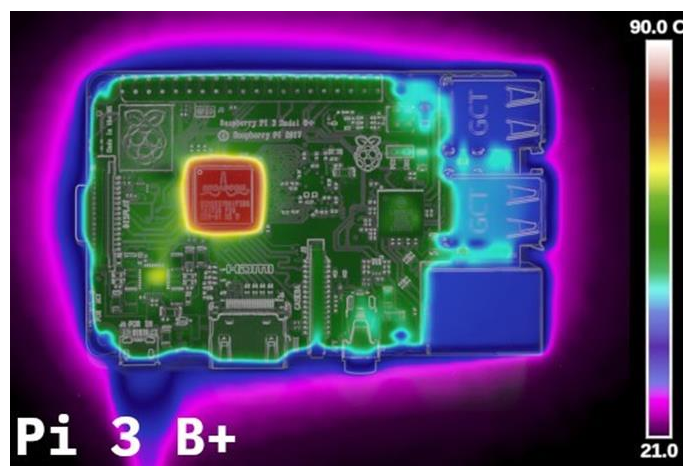


Ilustración 8 Distribución de la temperatura en la Raspberry Pi 3 B+ (Marín Herrero, 2020)

5. DISEÑO EXPERIMENTAL

Este apartado describe la construcción de la instalación experimental y los ensayos llevados a cabo en el presente trabajo.

5.1. COMPONENTES

5.1.1. Recipiente

Para contener al conjunto del refrigerante y del dispositivo electrónico se ha seleccionado un recipiente cilíndrico para que no haya esquinas y evitando, de esta forma, la aparición de grietas que puedan llevar a fugas del líquido dieléctrico. También cabe decir que gracias a ser una única pieza se evita la entrada de contaminantes al recipiente.

La tapa del recipiente es de acero inoxidable y será la encargada de actuar como superficie condensadora para recircular el Novec 649 y de esta forma mantener una cantidad constante de Novec dentro del recipiente haciendo innecesaria la colocación de un sensor de nivel para controlarlo. El esquema con las dimensiones se encuentra en el apartado 3 de los Anexos.

5.1.2. Sensores de temperatura

Para medir la temperatura se utilizarán 5 sensores DS18B20, siendo estos unos de los más adaptables que se encuentran en el mercado. Su rango de medición va desde -55°C a 125°C con un error de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ y el rango de trabajo del experimento está dentro del de funcionamiento. (Integrated, 2019) Se escogieron "no impermeables" dado que el Novec es un medio dieléctrico, y esto es más económico.

Cada sensor tiene 3 pines (V_{DD} , GND y DQ); tensión de alimentación, toma de tierra y el pin de datos, respectivamente. Lo que resulta interesante de la utilización de este tipo de sensor en lugar de termopares es el pin DQ. Por este pin se recibirán todos los datos por el protocolo 1-wire, lo que quiere decir que sólo se requiere un único cable para conectar varios de los sensores y solo hace falta utilizar 1 pin del microcontrolador ESP32. Esto proporciona el beneficio adicional de hacer necesario solo 3 cables en la tapa en lugar de un grupo de cables por termopar, traduciéndose en menor pérdida de Novec 649. (Hernández L. d., 2020)

5.1.3. Sensor de presión

Es necesario mantener la presión del recipiente cercana a la ambiental para evitar que aumente la temperatura de saturación del Novec 649 que, consecuentemente, aumentaría la temperatura de superficie necesaria para empezar el proceso de ebullición. Para ello se situará en la tapa un sensor de presión barométrica y humedad relativa Bosch Sensortech BME280 cuyo rango operacional va desde -40 a +85°C y de 300 a 1100 hPa. Tiene protocolo de comunicación I2C, por lo que requiere su propio cableado. (Bosch, 2020)

5.1.4. Microcontrolador ESP32

Para la transmisión de los datos se utiliza un módulo ESP32; un microcontrolador económico y de bajo consumo, que integra puertos de entrada/salida programables de los datos procedentes de los sensores, con conectividad Wi-Fi para su transmisión en tiempo real. Además, puede ser programado en Micro-Python, adaptación de Python para el entorno de los microchips.

5.1.5. Resistencias

5.1.5.1. Resistencias de potencia Bourns 35W

Antes de realizar los experimentos con la RPi4, se utilizarán resistencias de potencia para reproducir el calor disipado por un procesador. Para ello se necesita encontrar una resistencia plana de dimensiones similares a la del procesador y que disipe el mayor flujo de calor posible.

Después de analizar distintas resistencias se eligió la resistencia de potencia Bourns, 2.5Ω, 35 W Serie PWR263S-35. Su temperatura de operación, según la ficha técnica es de -55°C a 155°C.

El calor se transfiere en la placa inferior, y llega a disipar 33.32 W/cm².

$$\text{Área} = 10.1 \cdot 10.4 = 105.04 \text{ mm}^2 \quad (10)$$

$$\dot{Q} = \frac{\text{Potencia}}{\text{Área}} = \frac{35 \text{ W}}{105.04 \text{ mm}^2} \rightarrow \dot{Q} = 33.32 \text{ W/cm}^2 \quad (11)$$

En el caso de los experimentos, se colocarán dos resistencias en serie para poder simular de forma más precisa la superficie de un procesador. En este caso se trabajará con una resistencia de 5Ω .

5.1.5.2. Resistencia cerámica

Debido a que la resistencia Bourns no llega a proporcionar una temperatura muy alta, se escogió una resistencia de cerámica capaz de alcanzar 500°C con una resistencia de 20Ω y un voltaje variable de 2-38 V, con el objetivo de obtener la curva de ebullición del Novec 649.

5.2. INFRAESTRUCTURA DE COMUNICACIÓN

Para la lectura de los datos captados por los sensores no se utilizará la Raspberry Pi 4 por dos principales motivos: al estar dentro de un envase hermético y rodeada por el líquido no se puede garantizar la fiabilidad del WIFI y el hecho de sobrecalentarse puede interferir en la lectura. Consecuentemente, se selecciona la placa ESP32 que tiene WIFI integrado para poder transmitir los datos y 10 puertos GPIO para efectuar la lectura de los sensores.

En la ESP32 se puede programar tanto con MicroPython como con Arduino; debido a ser un lenguaje más útil de aprender para mi formación universitaria y a su mayor universalidad se escogió programar con MicroPython. Al no tener el Micro-Python en el EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory), se tuvo que grabar el firmware para poder habilitar el interpretador de MicroPython y, de esta forma, darle la capacidad al ESP32 de arrancar e interpretar en este lenguaje. Cada vez que se reinicia el dispositivo hay dos archivos que se ejecutan en orden (boot.py y main.py). Para programar todas estas acciones se utiliza THONNY; un entorno de desarrollo integrado (IDE) que facilita la escritura de programas en Python y la interacción con el ESP32 (por ejemplo, copiar, pegar, ejecutar...).

El programa a implementar en ESP32 tendrá que ser capaz de:

- Conectarse con una red WI-FI.
- Conectarse con un servidor Mosquitto (MQTT).
- Leer los sensores de temperatura DS18B20.

- Leer el sensor BME280 de presión/humedad/temperatura.
- Reenviar estos mensajes al servidor cliente MQTT y repetir este proceso indefinidamente.

En la Ilustración 9 se muestra cómo están conectados el microcontrolador ESP32, los sensores de temperatura y el sensor BME280.

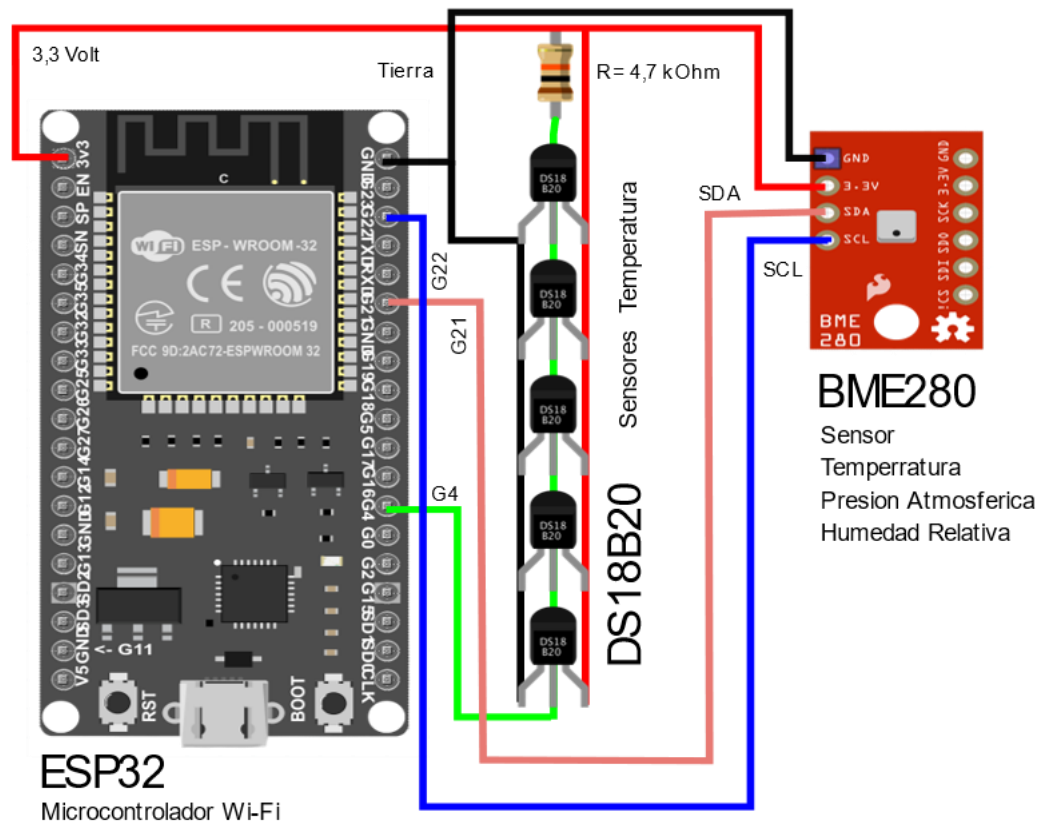


Ilustración 9 Distribución de los pins - Montaje electrónico

5.2.1. Captación de lectura de los sensores

Se instaló un servidor MQTT en un ordenador, específicamente el servidor Eclipse Mosquitto, que actúa como un servidor bróker de código abierto, para gestionar el envío de mensajes tanto de la Raspberry Pi 4 como de la ESP32 con los datos capturados y retransmitir todos estos datos a una central de acopio y procesamiento de la información, en nuestro caso el Node-RED. (Mosquitto, 2020) Se ha escogido este servidor principalmente porque:

- Es capaz de administrar tanto la recepción (suscripción) como la emisión (publicación) de mensajes desde distintos dispositivos a distintos dispositivos.
- Tiene comunicación bidireccional.
- Tiene bajos requerimientos de consumo de potencia de cálculo.

En la Ilustración 10 se muestra un esquema simplificado de los procesos de captura y visualización de datos explicados en este apartado.

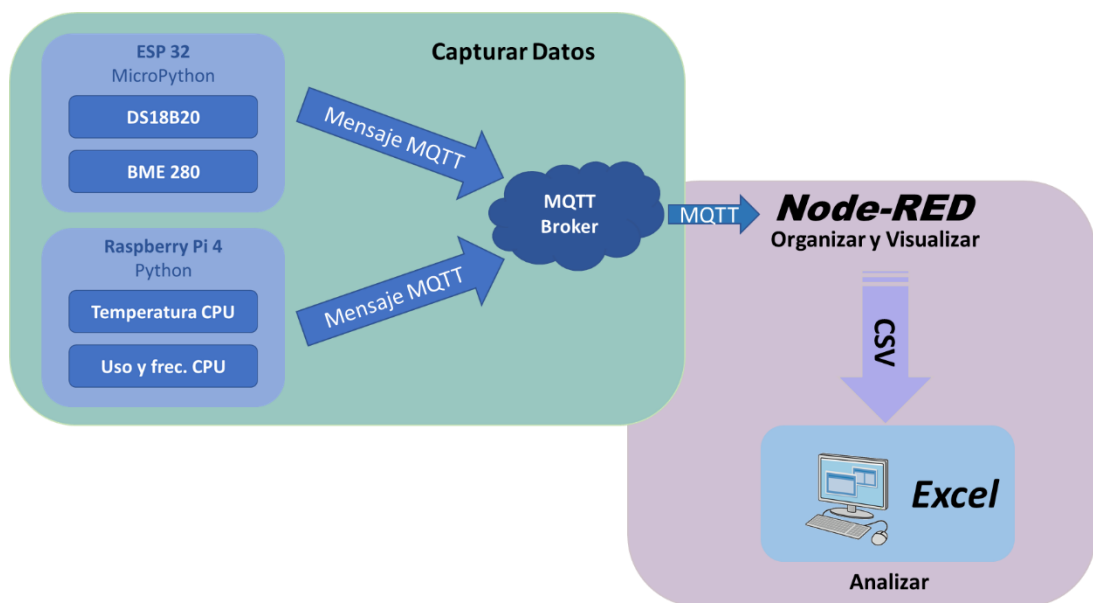


Ilustración 10 Esquema de los procesos de captura y visualización de datos

Como se estableció anteriormente, para la manipulación y lectura de datos se ha seleccionado Node-RED; una herramienta de programación de código abierto basado en tecnología NODE.JS desarrollada por IBM que permite conectar dispositivos físicos en el IoT. (Heath, 2014) Mediante esta herramienta se pueden manejar los datos, procesarlos y generar respuestas; además tiene incluido un editor visual de diagramas de flujo y una consola gráfica para visualizar la información, Ilustración 11. Estos valores serán capturados en un archivo de texto .csv (comma-separated values), reporte que generará el Node-RED, para ser procesados posteriormente en Excel.

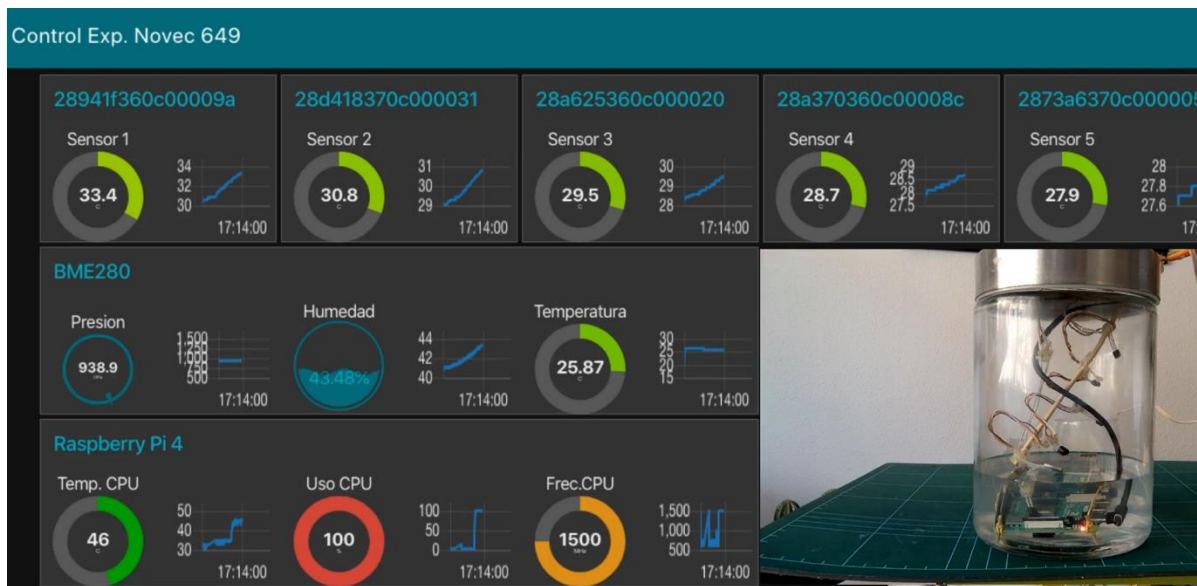


Ilustración 11 Visualización de la ventana de Node-RED durante el experimento

5.2.2. Lenguaje de programación

Para la infraestructura informática del experimento, se ha programado tanto con Python como con Micro-Python. El Python se usó para crear un programa en la RPi que lea los parámetros del Hardware (como frecuencia, temperatura y uso del CPU) y construya un mensaje MQTT publicándolo por Wi-Fi. El Micro-Python fue utilizado para programar una aplicación similar, pero en el microprocesador ESP32. En el apartado 4 de los Anexos se encuentran los códigos utilizados.

5.3. ENSAYOS

Se realizarán dos tipos de ensayos en los que se comparan los efectos de refrigeración de la convección forzada con aire (método convencional) y los de la refrigeración por inmersión en el líquido dieléctrico. Cada uno de estos ensayos se llevarán a cabo con las resistencias y la RPi4.

Los experimentos fueron grabados mediante dos webcams y el OBS Studio (open broadcaster software), un programa de código abierto para crear vídeos en vivo que permitió unir en tiempo real, videos de WebCams y capturar la ventana del Dashboard de NODE-Red.

5.3.1. Ensayo de convección forzada

Se colocará un ventilador de modo que insufla aire de forma paralela a la superficie del dispositivo, utilizando la convección forzada para enfriarlo.

5.3.1.1. Dos resistencias Bourns en serie

El experimento consiste en variar la potencia introducida a la resistencia manteniendo constante el flujo de aire. En este apartado se comprobó la variación de la temperatura en la superficie de la resistencia frente a la potencia que recibe en tres modalidades distintas de flujo: 0, 1 y 1.5 m/s, trabajando asimismo, tanto con el mecanismo de convección natural ($V_{\text{aire}} = 0 \text{ m/s}$) como con el de convección forzada ($V_{\text{aire}} > 0 \text{ m/s}$).

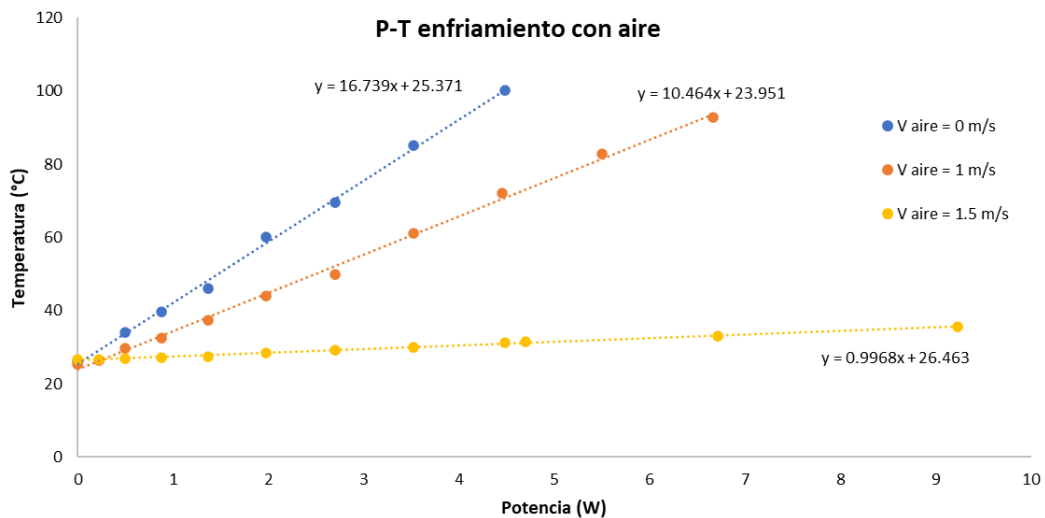


Ilustración 12 Representación del enfriamiento mediante convección forzada

De la Ilustración 12, se obtienen dos conclusiones:

- Independientemente de la velocidad del aire, al aumentar la potencia aumenta la temperatura de la superficie con una fuerte tendencia lineal. Permitiendo comprobar, como era de esperar, que la temperatura es dependiente de la potencia, $T = f(\text{Potencia})$. El coeficiente de convección, h , no es una magnitud física real sino una definición que tiene más de dos siglos y que ha facilitado (y sigue haciéndolo) los cálculos en problemas

convectivos. Según esta definición $h = \frac{\dot{Q}}{A \cdot \Delta T}$, se presupone una relación lineal entre el calor intercambiado por ambos y su diferencia de temperaturas. La linealidad se mantiene con bastante precisión en la convección forzada, pero no en la natural y en la gráfica se puede apreciar este fenómeno.

- A medida que se calienta la superficie de la resistencia se forma una capa límite aislante que calentará el aire a su alrededor. El flujo de aire destruirá esta capa límite, permitiendo la entrada a nuevo aire frío que reemplazará el aire caliente original. Por este motivo se observa una disminución de la temperatura en la superficie de la resistencia a medida que aumenta la velocidad del flujo del aire.

5.3.1.2. Raspberry Pi 4

Para saber cómo afecta la convección forzada al enfriamiento de la Raspberry Pi 4, primero fue necesaria la obtención de una base de trabajo obteniendo los valores de temperatura, potencia y frecuencia del SoC cuando el dispositivo se encuentra sin carga de trabajo computacional exceptuando el funcionamiento del sistema operativo y del programa Python que registra datos del SoC. A continuación, se produjo una prueba de estrés maximizada cuya duración fue de 120 s, obteniendo los valores de funcionamiento máximos que se observan en la Ilustración 13.

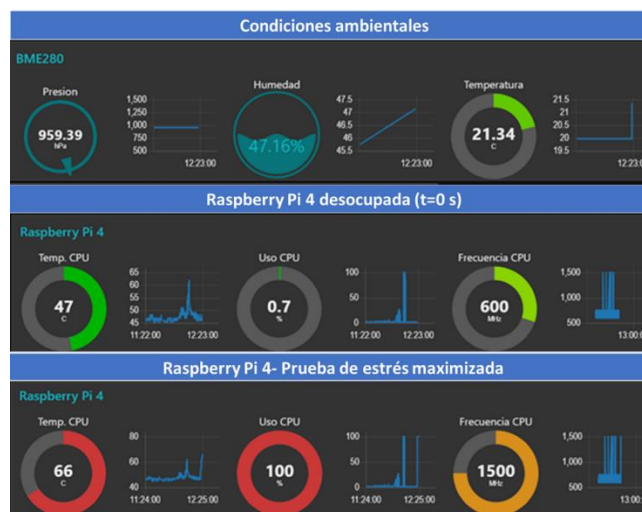


Ilustración 13 Valores obtenidos en la prueba de estrés de la Raspberry Pi 4

A continuación, se realizó un ensayo de estrés prolongado, donde se tuvo a la RPi4 trabajando a máxima capacidad durante 5 minutos con y sin corriente de aire.

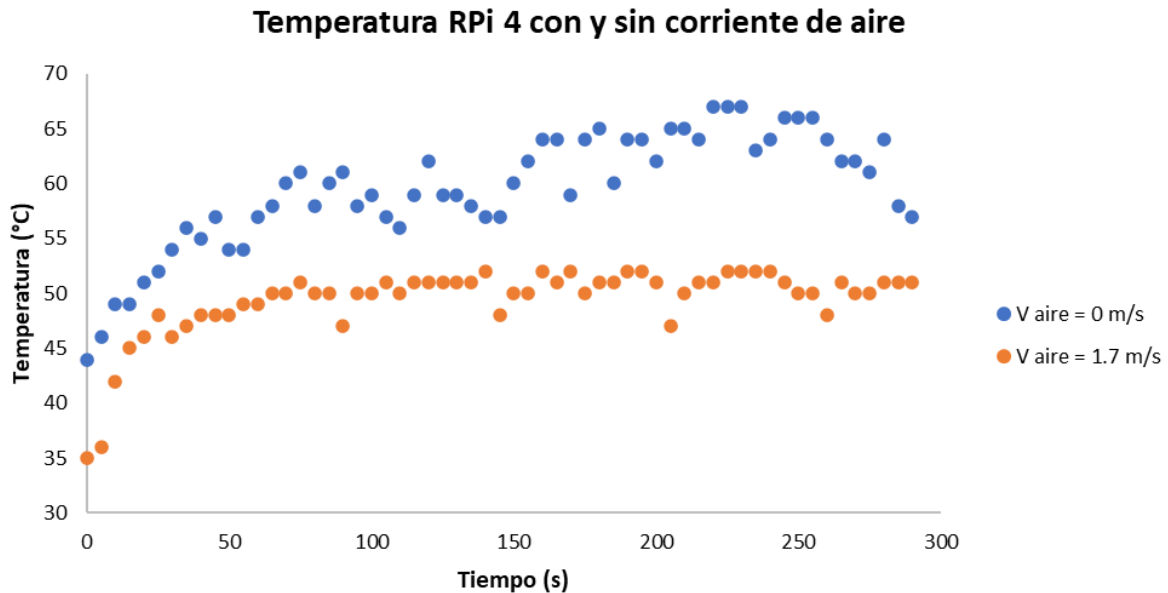


Ilustración 14 Temperatura de la CPU de la RPi 4 con y sin convección forzada

Como se puede observar en la Ilustración 14, hay una importante fluctuación de la temperatura en el caso de la prueba sin aire comparado con aquella con corriente de aire, debido al “mecanismo de protección” de la RPi4, explicado en el apartado 3.1 de funcionamiento de un procesador. Cuando la temperatura del SoC supera los 55°C, el propio procesador intenta cambiar la frecuencia de operación para disminuir su temperatura. Debido a este “mecanismo”, en cuanto la temperatura supera este umbral, disminuye hasta los 55-60°C y después vuelve a aumentar la frecuencia y aumenta la temperatura de nuevo. Este efecto no se observa cuando el dispositivo es enfriado mediante la corriente de aire, ya que, al no sufrir un aumento tan drástico de temperatura, el procesador no necesita disminuir tantas veces la frecuencia, operando de una forma mucho más estable.

5.3.2. Ensayo de inmersión bifásica

Como se ha mencionado con anterioridad, el dispositivo y el líquido irán ambos dentro del recipiente de vidrio. La altura del Novec 649 es de 3 cm, ya que permite cubrir completamente la RPi4. Todos los experimentos están iniciados a una

temperatura inferior a los 40°C para poder captar, en su totalidad, el proceso de ebullición y se va aumentando gradualmente la potencia de entrada para ir incrementando poco a poco la temperatura.

Para estos experimentos, se controla la temperatura usando 5 sensores de temperatura DS18B20 y la potencia utilizando una fuente de alimentación cuya tensión máxima son 31V.

5.3.2.1. *Dos resistencias Bourns en serie*

Una vez sumergidas las resistencias en el Novec, se fue aumentando la potencia de alimentación para ir elevando su temperatura. La temperatura del sistema se midió en cuatro zonas: pegada a la resistencia, en el líquido, en la interfase y en el interior de la tapa, mostrado en la Ilustración 15. También se registraron la presión y humedad en la superficie interna de la tapa (Sensor BME280).

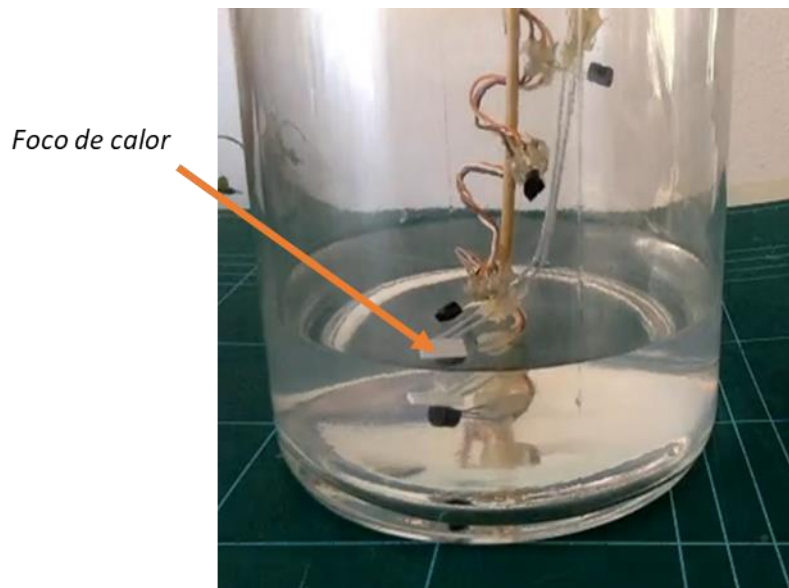


Ilustración 15 Montaje experimental - Resistencia sumergida en Novec 649

Los resultados obtenidos durante el experimento se muestran a continuación:

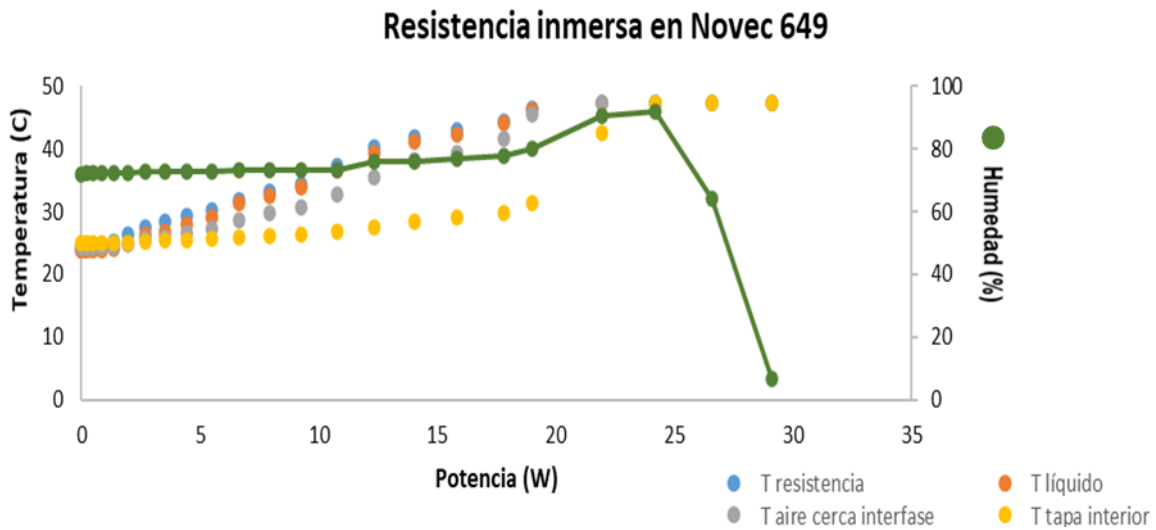


Ilustración 16 Valores de temperatura y humedad de la resistencia inmersa en Novec 649

Como se puede apreciar en la Ilustración 16, la zona pegada a la resistencia es la primera en alcanzar los 49°C, punto donde empieza a hervir el Novec 649. Rápidamente el líquido alcanza la misma temperatura y poco a poco el resto del sistema se estabiliza en su temperatura de ebullición.

El sensor de humedad funciona midiendo la conductividad dentro del aire, por lo que cuando llega el vapor de Novec, al ser dieléctrico, el valor leído de la humedad irá bajando. La humedad permanece constante durante la mayor parte del proceso, hasta que la temperatura cerca de la tapa alcanza los 49 °C (debido al vapor que llega) en cuyo momento el vapor de Novec desplaza al aire y consecuentemente ocasiona su disminución. En Ilustración 16 se aprecia perfectamente como, a los 25W, la tapa alcanza la misma temperatura que el resto del sistema y cae abruptamente la humedad indicando un entorno saturado de Novec vapor.

5.3.2.2. Obtención de la curva de ebullición nucleada

Para comprobar la curva de ebullición teórica calculada anteriormente, se realizó un ensayo con una resistencia cerámica autoajutable y voltaje variable 0-38V con una temperatura máxima de 500°C. El calor disipado (q_s'') fue calculado a partir de la potencia suministrada por la fuente ($P = V \cdot I$) dividida por el área de la resistencia (1 cm^2). Considerando que la potencia de alimentación es igual al calor cedido por convección al

Novec 649 y habiendo medido la temperatura del líquido pegado a la resistencia, se calcula la temperatura a la que se encuentra la superficie mediante la correlación de Rohsenow, ecuación (4), ya que esta es la más recomendada universalmente. No obstante, estos valores fueron comprobados calculando la temperatura mediante la convección en la superficie; obteniéndose los valores de la Tabla 5.

Tabla 5 Proceso de ebullición

$q_s'' \text{ (W/cm}^2\text{)}$	Temperatura resistencia (°C)		Observaciones
	Rohsenow	Convección	
0	25.3	25.3	
0.85	39.51	36.47	
1.95	46.72	49	Aparecen las primeras burbujas en la mitad del dispositivo. Burbujas pequeñas y en finas columnas.
3.47	52.63	50.09	Burbujas suben más rápido.
5.48	58	56.77	Burbujas aumentan de tamaño. Mayor velocidad. Comienza la ebullición nucleada.
7.98	64.29	62.32	Columnas de las burbujas salen de los extremos de la resistencia.
14.53	71.15	73.39	Burbujas llegan con más fuerza a la superficie.
19.77	89.17	87.78	Empieza a saltar el Novec de la superficie. El vapor sube agresivamente.

A continuación, se muestran las fotografías tomadas durante el proceso, en el cual está marcada la temperatura a la que se encontraba sometida la resistencia en aquel momento.

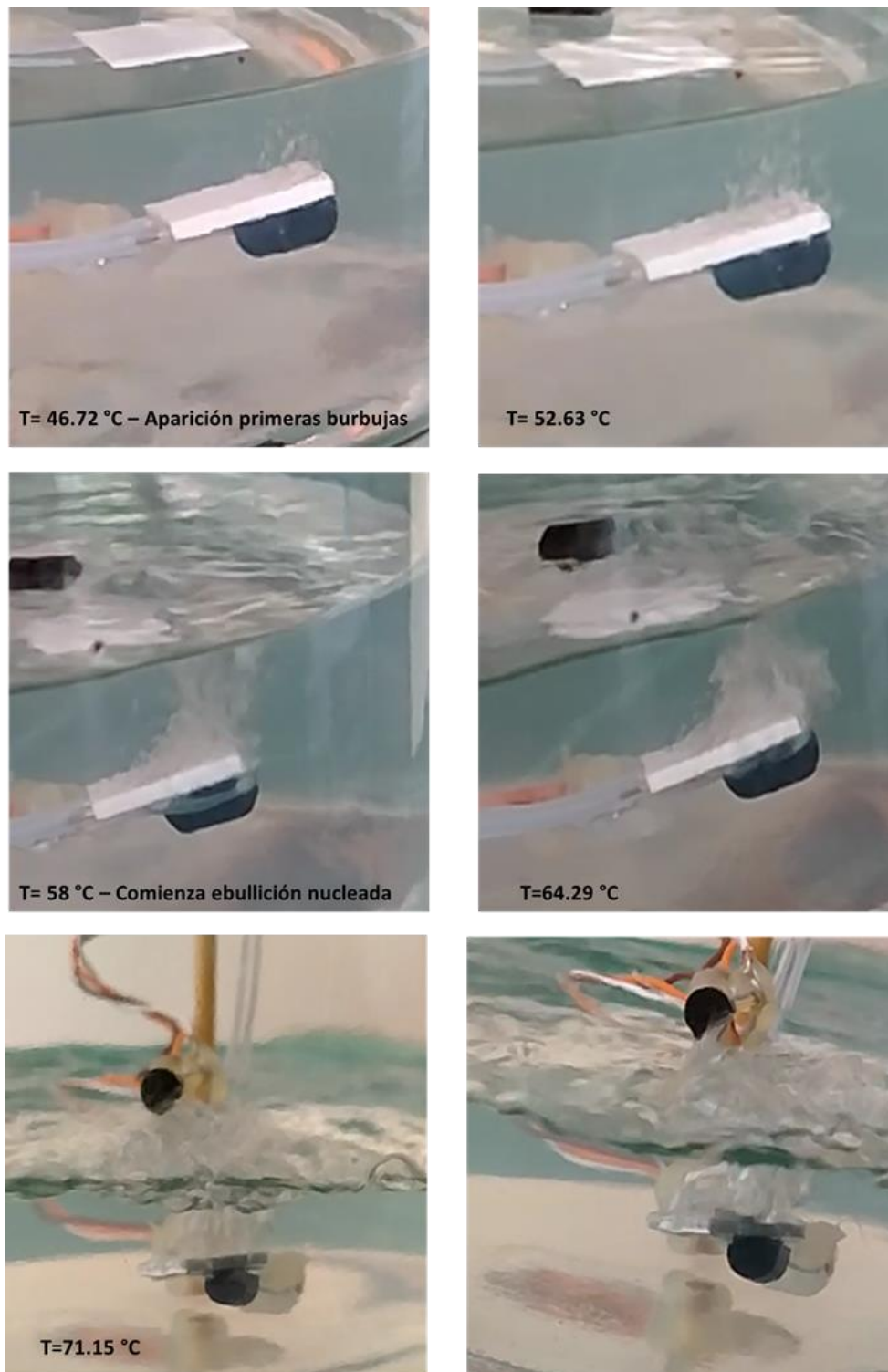
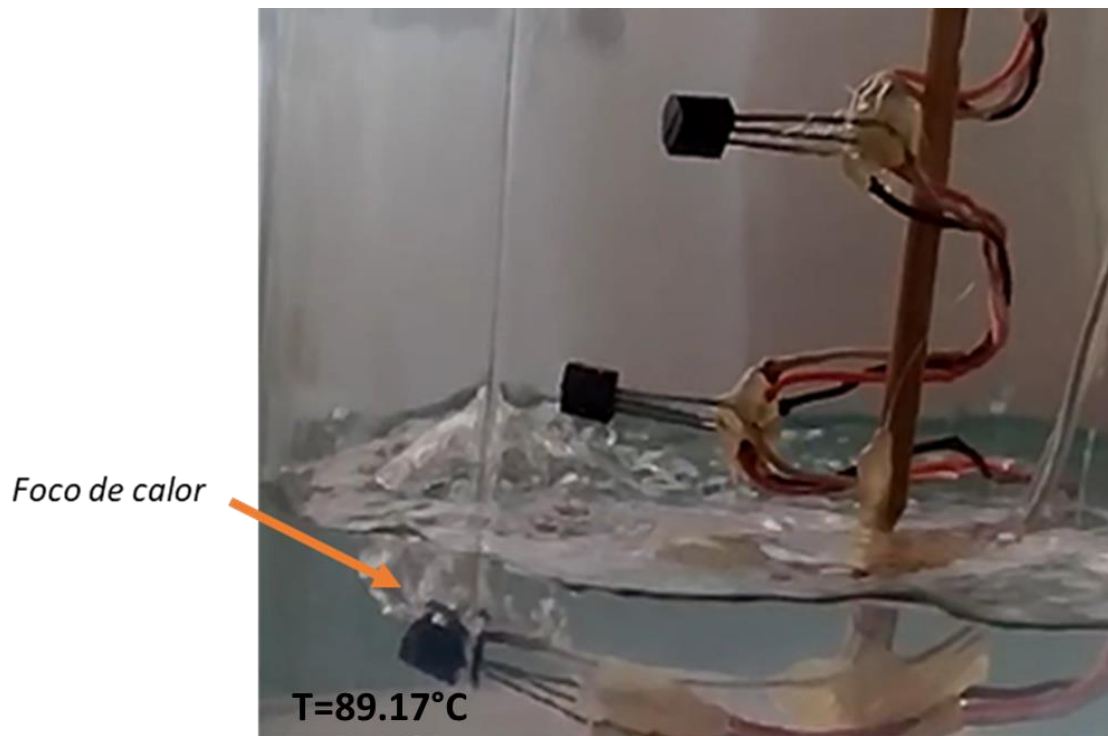


Ilustración 17 Demostración fotográfica del proceso de ebullición nucleada

*Ilustración 18 Temperatura al final del experimento*

En la Ilustración 19 se muestra la curva de ebullición experimental del Novec 649. A medida que se incrementa la potencia de alimentación aparecen las primeras burbujas pequeñas. Al seguir aumentando la temperatura, surgen más zonas de nucleación, hasta que toda la superficie se encuentra cubierta de burbujas grandes, esto es lo que se consideraría el comienzo de la zona de ebullición nucleada. Se continúa aumentando la potencia y se observa la creación de columnas de vapor, por lo cual se da por finalizada la ebullición nucleada. A medida que se iba calentando la resistencia se estima que se llegó al punto crítico, alrededor de los 88 °C, y todo el vapor se concentraba en una única columna de burbujas grandes. Debido a que el tamaño de las burbujas dificulta el contacto del líquido sobre la superficie ocasiona un aumento en su temperatura de superficie. Este aumento se tradujo en un cambio de la resistencia de 20 Ω a 50 Ω , donde el voltaje y la intensidad fueron regulados por la propia fuente para mantener la misma potencia de trabajo.

La diferencia de forma entre la curva de la Ilustración 19 y la de Nukiyama, Ilustración 3, es debida al uso de ejes logarítmicas en la segunda.

Curva de ebullición del Novec 649

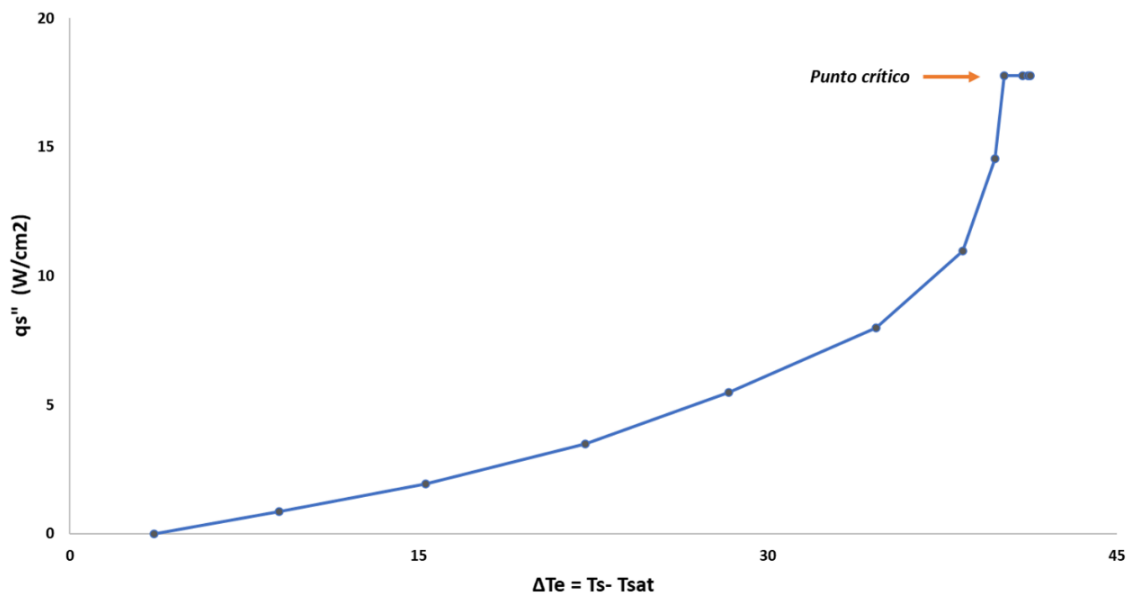


Ilustración 19 Curva de ebullición del Novec 649

5.3.2.3. Raspberry Pi 4

El montaje experimental para la refrigeración de la RPi4 en el Novec, mostrado en la Ilustración 20, fue idéntica a la de las resistencias simplemente cambiando estas últimas por el dispositivo.

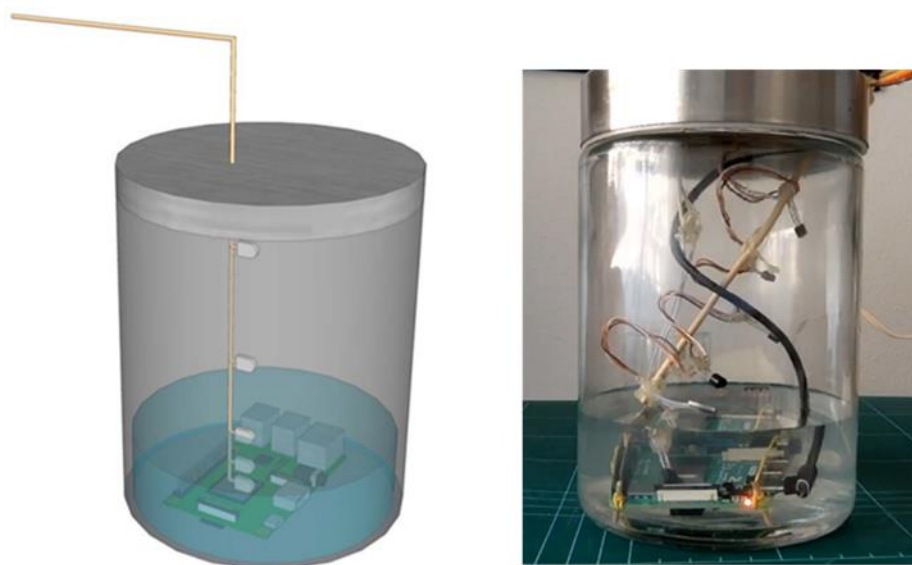


Ilustración 20 Esquema y montaje experimental - RPi4 sumergida en Novec 649

La frecuencia de trabajo máxima de la Raspberry Pi 4 es de 1500 Hz; pero para estos experimentos se excedió este valor y se tuvo trabajando a 2000 y 2150 Hz. Para forzar la frecuencia de trabajo a niveles superiores de la frecuencia máxima de diseño se utilizó una aplicación ya diseñada para la RPI4 llamada *Commander Pi*.

Una vez el dispositivo se encontraba inmerso en el Novec 649 y se había alterado la frecuencia mediante Commander Pi, se le exigió trabajar a una frecuencia de 2000Hz durante 50 min. Una vez transcurrido este tiempo, se aumentó la frecuencia a 2150 Hz (lo máximo permitido por el programa de *overclocking*) durante otros 20 minutos. Este exceso de frecuencia se llevó a cabo porque trabajando a 1500Hz no se observó un cambio significativo en la temperatura del SoC. Para poner la acción en funcionamiento se utilizó el programa stress-ng, que permite realizar pruebas de estrés en la CPU del dispositivo. Un ejemplo del comando utilizado sería "stress-ng --CPU 4 --timeout 300", que activa los 4 núcleos del procesado durante 300 segundos. Para la comunicación remota via terminal desde el ordenador a la RPi se utilizó el comando SSH y el VNC (servidor) y cliente (PC) para la comunicación remota al escritorio de la RPi.

Los resultados, graficados en la Ilustración 21, muestran

- Para un incremento de 15 °C de la temperatura interna del CPU, se obtiene un incremento de 10 °C tanto para el líquido como para el aire.
- El incremento de temperatura que sufre el líquido es igual al que sufre el aire, y se lleva a cabo de forma lineal.

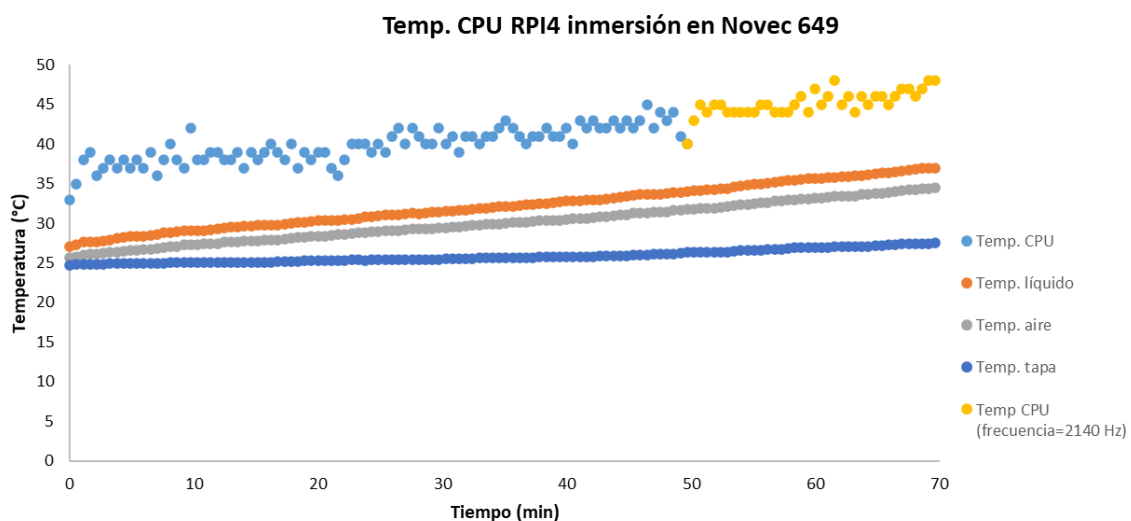


Ilustración 21 Resultados experimento inmersión RPi 4 en Novec 649

5.4. COMPARACIÓN DE LA REFRIGERACIÓN POR AIRE Y EBULLICIÓN

Como se mencionó anteriormente se ha experimentado con dos métodos de enfriamiento; por aire y por ebullición. En este apartado se comparará la eficiencia un método respecto del otro.

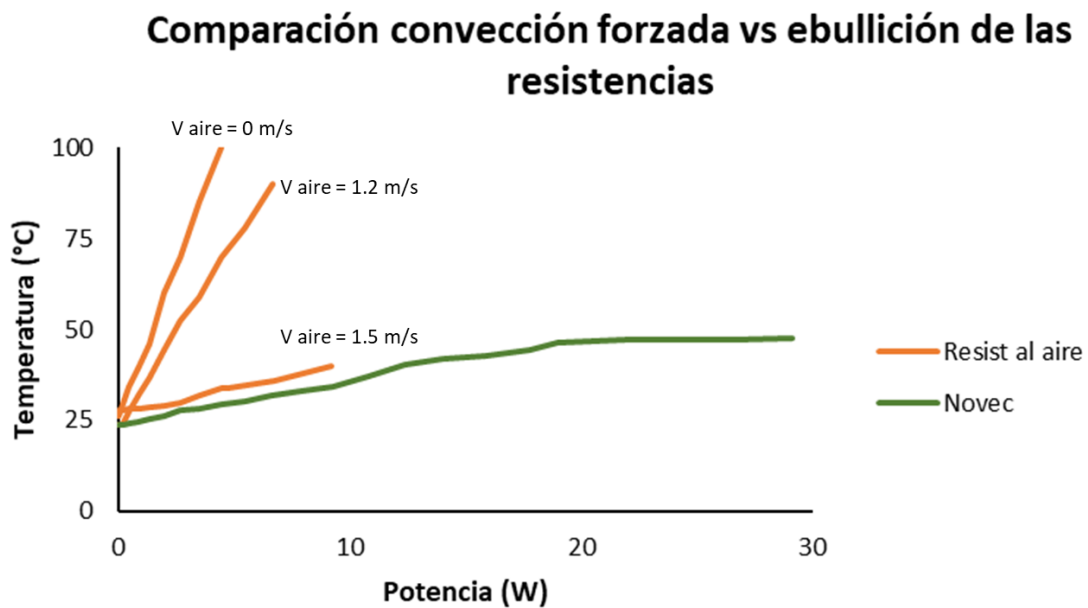


Ilustración 22 Gráfico temperatura-potencia de enfriamiento por aire y ebullición

En la Ilustración 22, se presenta la comparación de ambos tipos de refrigeración para los ensayos con las resistencias. Las curvas anaranjadas representan el enfriamiento mediante aire a distintas velocidades y la curva verde indica el enfriamiento mediante la ebullición del Novec 649, como se puede observar las curvas del enfriamiento con aire están todas por encima de la del Novec; indicando que la utilización del Novec le permite al dispositivo aprovechar toda su potencia de trabajo sin sufrir estrés térmico.

Si se tiene en cuenta que los servidores de los Centros de Datos pueden llegar a consumir alrededor de 140 W por procesador (García, 2017), se deduce de la figura que la refrigeración con aire solo es viable con velocidades del mismo muy superiores a las usadas en este trabajo, como de hecho sucede en la práctica, ya que cada servidor incorpora varios ventiladores de aspiración del aire cuyo consumo se suma al consumo general de climatización. Obviamente, para una misma potencia de alimentación, la

temperatura del dispositivo inmerso en el Novec 649 será menor si se encuentra expuesto al aire.

Durante todo el proceso de ebullición nucleada, el cociente calor disipado / ΔT es alto, lo cual significa que el dispositivo puede trabajar a mayor potencia sufriendo un cambio mínimo en su temperatura. Esta ventaja estará presente hasta que se llegue al punto crítico.

En la Ilustración 23 se compara el experimento realizado con la RPi 4 inmersa en el fluido dieléctrico contra aquél cuyo enfriamiento era mediante aire. Cabe resaltar que la frecuencia del dispositivo en el Novec fue prácticamente 1.5 veces mayor que la del dispositivo en el aire, y aún así no llega a superar los 40°C, mientras que estando al aire y a 1500 Hz la temperatura del dispositivo alcanza de forma casi instantánea los 50°C y sigue subiendo apreciablemente hasta su temperatura de operación máxima de 85°C (Pi, 2020). Esto significa que, tal y como se esperaba, el proceso de refrigeración mediante inmersión proporciona un beneficio significativo en la utilización de los procesadores por encima de sus capacidades nominales durante un tiempo prolongado.

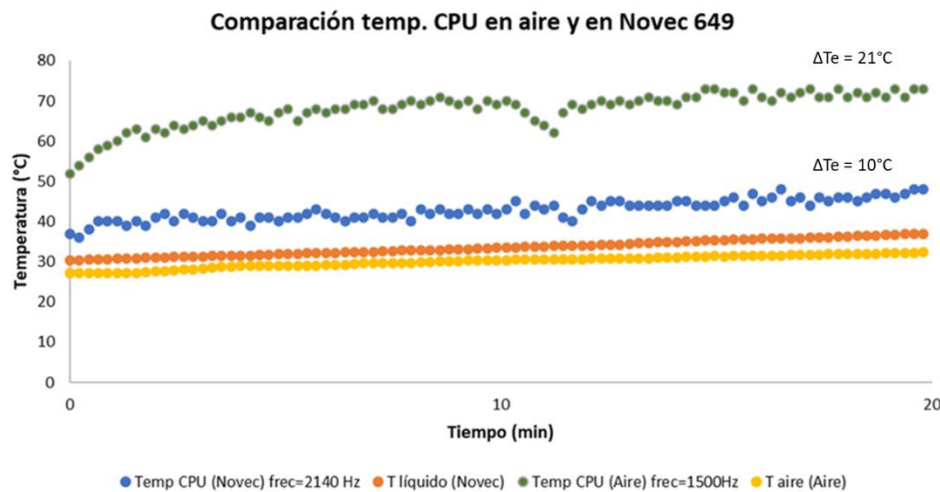


Ilustración 23 Comparación de la variación de la temperatura en los experimentos realizados con la RPi4

Como se había mencionado anteriormente, la placa de circuito impreso (PCB) de la Raspberry Pi funciona como una aleta disipando el calor por conducción a lo largo de toda la placa, cuya consecuencia es que la refrigeración con Novec le permite trabajar al límite de sus posibilidades informáticas sin experimentar ningún perjuicio térmico.

6. RENTABILIDAD DE LA TÉCNICA

6.1. ANÁLISIS ECONÓMICO

El proceso de inmersión bifásico en líquido tiene un alto capital inicial, ya que se tiene en cuenta el alto coste del líquido dieléctrico ($98.9 \text{ Euros}/\text{kg}$), el recipiente y el condensador. Aun así, presenta una oportunidad para disminuir los costes de enfriamiento a largo plazo.

Para saber si resulta rentable utilizar esta técnica se calculó el coste para enfriar un pequeño centro de datos cuya potencia fuera de 50 kW tanto mediante corriente de aire como con inmersión en líquido. Sólo se ha tenido en cuenta el coste del proceso de enfriamiento y no el consumo de energía propio del equipo ya que en ambos casos sería el mismo. El tiempo de operación es el correspondiente a trabajar 24/7 durante un año entero (8760 h/año) y el coste de la electricidad es de $0.08 \text{ Euro}/\text{kWh}$ (Selectra, 2020). En cuanto al coste del sistema de refrigeración por inmersión, se hizo una media de los precios ofertados por GRC, Submer y Allied Control donde el coste de un recipiente con condensador apto para disipar 50 kW (sin el líquido) se encuentra alrededor de unos 28.000 Euros y su capacidad es de 650 L de líquido.

Con toda esta información recopilada se calculó el gasto anual de la instalación, obteniendo un coste de 35.040 Euros/año en la instalación de enfriamiento por corriente de aire y un único pago de 130.856 Euros en la instalación de enfriamiento por inmersión bifásica; resultados expuestos en la Ilustración 24.

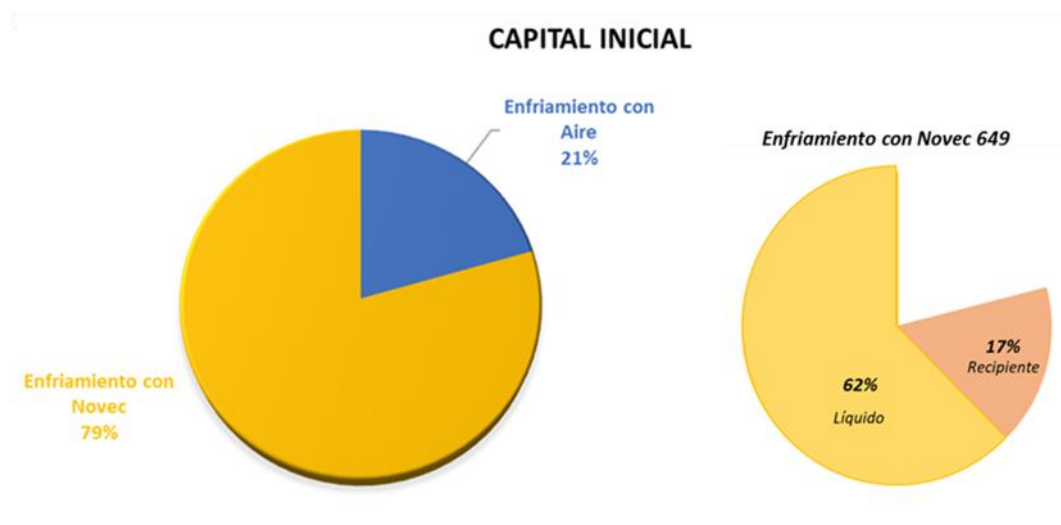


Ilustración 24 Comparativa del capital inicial necesario para ambos modelos de instalación

Siendo cierto que la inmersión en líquido dieléctrico tiene un coste inicial sustancialmente mayor, se calcula el plazo de recuperación para saber en cuánto tiempo se recuperará el capital inicial de la inversión, según la ecuación (12), obteniendo un plazo de recuperación de **3 años y 9 meses (3.73 años)**.

$$\text{Punto de retorno inversión} = \frac{\text{Inversión Inicial enfriamiento Novec 649}}{\text{Anualidad equivalente del gasto por aire}} \quad (12)$$

Cabe especificar que este cálculo no tiene en cuenta la inflación, las posibles pérdidas de Novec así como el mantenimiento o reparaciones que pueden haber a lo largo de este plazo, por lo que para tener un análisis un poco más preciso se puede calcular el plazo de recuperación descontado, (13), donde R es la tasa de descuento, I la inversión inicial y C la anualidad equivalente del gasto por aire.

$$\text{Punto de retorno inversión descontado} = \frac{\ln\left(1 - \frac{I \cdot R}{C}\right)}{\ln(1 + R)} \quad (13)$$

Para el valor de la tasa de descuento se ha utilizado $R = 3.56 \%$, siendo este valor el correspondiente al promedio de los últimos años a largo plazo. (YCharts, 2020). Finalmente se obtiene que el plazo de recuperación descontado es de **4 años y 28 días (4.08 años)**.

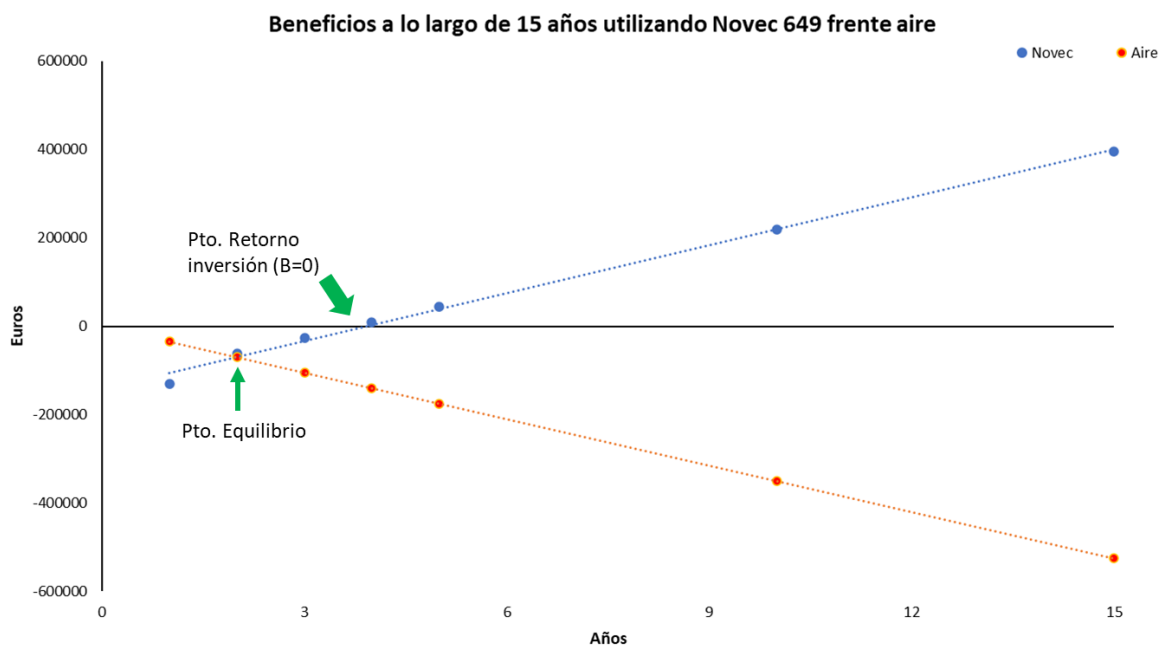


Ilustración 25 Análisis de comparación inversión Novec vs por aire

El punto de equilibrio, es decir, cuando los costes de enfriamiento por aire están igualados al coste de la inversión de Novec 649, tiene lugar aproximadamente a los 2 años.

Por especificaciones del fabricante es recomendable cambiar el líquido cada 15-20 años, por lo que el beneficio al cabo de 15 años de utilizar la técnica de inmersión es de **394.744 Euros**.

6.2. IMPACTO AMBIENTAL

Para evaluar el impacto ambiental se utilizará el concepto de la huella de carbono, esto es, la cantidad de gases efecto invernadero primordialmente el CO₂, que son emitidos a la atmósfera mediante algún proceso de la actividad humana. Para el caso de la producción de electricidad, parte de esta se produce por la combustión de combustibles fósiles y se estima que por cada kWh se emite a la atmósfera 0.265 kg CO₂. (Eléctrica, 2017)

Utilizando el ejemplo dado en el estudio económico para refrigerar una instalación de 50 kW por aire se emitirían 13.25 kg CO₂ cada hora ($50 \text{ kW} \cdot 0.265 \text{ kg CO}_2/\text{kWh} = 13.25 \text{ kg CO}_2/\text{h}$), por lo que al año se emitirían 116.07 toneladas de CO₂ a la atmosfera simplemente refrigerando la instalación. Cantidad que podríamos dejar de liberar a la atmósfera utilizando la refrigeración por ebullición con Novec.

Si se traslada esta cantidad a una instalación de cualquier dimensión, la utilización de Novec 649 como refrigerante proporciona un ahorro de $2321.4 \text{ kg CO}_2/\text{kW} \cdot \text{año}$.

6.3. OTRAS APLICACIONES

Dentro de las posibles aplicaciones de la refrigeración por inmersión se encuentra, no solo el enfriamiento de procesadores estudiado en este TFG, sino también resultaría una excelente herramienta en el mundo de la minería de criptomonedas ya que este tipo de trabajo necesita unos mega centros de datos para poder procesar las transacciones; capacidad que se traduce en altos costes de enfriamiento y de gasto de energía. (Business Wire, 2015)

También ha demostrado ser útil en el enfriamiento de Rayos X en escáneres industriales. Si el escáner falla puede parar toda una planta de manufactura o interrumpir el proceso de chequeo de seguridad, causando grandes retrasos. (Ducharme, 2018) Por lo que el uso de este método de enfriamiento aseguraría alta fiabilidad y solución para disipar las grandes cantidades de calor generadas en estos escáneres industriales de Rayos X.

Otro posible uso sería para los fabricantes de baterías y vehículos eléctricos. Se estima que en 2030 habrán alrededor de 21 millones de vehículos eléctricos (Deloitte, 2019) pero esto solo será posible si se llega a solucionar uno de los retos aún presentes: la gestión térmica; mantener la temperatura de la batería en un valor constante. Si la batería se sobrecalienta se acelera su propia degradación y, en posibles casos, existe el riesgo de un incendio. Por lo tanto, en la ausencia de un método de enfriamiento eficiente, los fabricantes tendrán limitaciones en la velocidad de recarga y la potencia que pueden llegar a tener estos automóviles. (Fraunhofer-Gesellschaft, 2012) Si se utiliza el método de inmersión por refrigeración, se previene este sobrecalentamiento y, consecuentemente, los fabricantes podrán aumentar la potencia de salida para un mayor rendimiento del vehículo y permitir una recarga de alta velocidad. Esta protección que otorgaría el método de enfriamiento por inmersión ayudaría a alargar la vida útil de las baterías.

7. CONCLUSIONES

Como se ha podido determinar a lo largo de todos los experimentos, el enfriamiento mediante la ebullición de un líquido dieléctrico ofrece claras ventajas sobre el enfriamiento tradicional por aire. La utilización de esta técnica ofrece una menor variación de temperatura incluso trabajando en condiciones extremas, aumentando la eficiencia del procesador además de tener la capacidad de disipar una gran cantidad de calor variando mínimamente la temperatura del fluido.

Uno de las ventajas más claras es la eficiencia del transporte del calor. Calculando la relación Q_{lat}/Q_s según la ecuación (14) se confirma que el calor latente, es mayor que el calor sensible. Debido a esta preponderancia, el sistema bifásico puede transportar una cantidad considerablemente mayor de calor por masa de fluido.

$$\frac{Q_{lat}}{Q_s} = \frac{L}{C \cdot \Delta T} = \frac{88000 J/kg}{1118.07 J/kg \cdot ^\circ C \cdot 10^\circ C} = 7.87 \quad (14)$$

Otro factor en juego es la conductividad térmica de ambos medios. La conductividad del aire es de $0.024 W/m \cdot K$ mientras que la del Novec 649 es $0.059 W/m \cdot K$, resultando mejor el Novec para conducir el calor, disminuyendo con mayor rapidez la temperatura en la superficie del dispositivo.

Utilizando el sistema de enfriamiento mediante ebullición en lugar del de aire, se obtiene un incremento del 50% en la retirada de calor del dispositivo sin la necesidad de procesos secundarios de enfriamiento, ahorrando significativamente en gastos. Además, sabiendo que el calor disipado por el procesador no será superior al del punto crítico no corremos el riesgo de pasar de una ebullición nucleada a una en película y, consecuentemente, no habrá un exceso peligroso de temperatura en la superficie.

Económicamente presenta una fuerte inversión inicial, pero es recuperable al cabo de 4 años y permite un ahorro del 75% a lo largo de 15 años. Medioambientalmente, el uso de Novec 649 como refrigerante, proporciona una reducción en la emisión del CO₂ a la atmósfera de $2321.4 \text{ kg CO}_2/kW \cdot \text{año}$ considerando que no hay pérdidas de Novec al ambiente.

Finalmente, en cuanto a la compatibilidad del líquido dieléctrico con el dispositivo, no hubo ninguna interrupción con el paso de corriente del compuesto electrónico totalmente sumergido en este líquido. Por lo tanto, se puede afirmar con certeza que el

comportamiento dieléctrico del líquido no perjudicó en el funcionamiento ni frecuencia de la CPU. Después de varias semanas de experimentos no se ha observado ninguna reacción química entre el Novec 649 y el sistema formado por el material metálico de la parte electrónica y el vidrio del recipiente. El único cambio visible fue una disminución en la translucidez del líquido después de los experimentos; probablemente debido a la presencia de impurezas y residuos sobre el dispositivo.

En el QR se puede acceder a algunos vídeos de los experimentos realizados.



<https://www.youtube.com/channel/UCpsmS2gmMD26LdxbHO-3HQ/>

BIBLIOGRAFÍA

3M. (Noviembre de 2017). Obtenido de *Heat transfer fluids brochure*:
<https://multimedia.3m.com/mws/media/654950/3m-heat-transfer-fluids-brochure.pdf>

3M. (Octubre de 2017). *Novec* . Obtenido de *heat transfer product line*:
<https://multimedia.3m.com/mws/media/14544260/3m-novec-heat-transfer-product-line-card-2016-spanish-version.pdf>

3M. (2018). Obtenido de *Data driven. Advancing a sustainable future.*:
<https://multimedia.3m.com/mws/media/15252870/data-driven-immersion-cooling-infographic-high-res-pdf.pdf>

Anderson, T. (22 de Julio de 2019). *Raspberry Pi 4: Too hot to handle*. Obtenido de The Register:
https://www.theregister.co.uk/2019/07/22/raspberry_pi_4_too_hot_to_handle/

Bach, M. (28 de Octubre de 2014). *Puget Systems*. Obtenido de Impact of Temperature on Intel CPU Performance:
<https://www.pugetsystems.com/labs/articles/Impact-of-Temperature-on-Intel-CPU-Performance-606/>

Bosch. (2020). *Bosch- Sensortec*. Obtenido de <https://www.bosch-sensortec.com/products/environmental-sensors/humidity-sensors-bme280/>

Business Wire. (11 de Diciembre de 2015). Obtenido de <https://www.businesswire.com/news/home/20151211005837/en/BitFury-Launch-Energy-Efficient-Immersion-Cooling-Data>

Chandrasekaran, S. (2017). *Experimental investigation of flow boiling characteristics of an immersion cooled server model*. Alabama: Auburn University.

Deloitte. (21 de Enero de 2019). Obtenido de <https://www2.deloitte.com/uk/en/pages/press-releases/articles/21-million-more-electric-vehicles-expected-worldwide-by-2030.html>

Digital, e. (Marzo de 2020). *eit Digital*. Obtenido de <https://www.eitdigital.eu/newsroom/blog/article/smart-cities-and-tech-evolution-ii-the-moores-law/>

Ducharme, G. (6 de Marzo de 2018). *Industrial Equipment News*. Obtenido de <https://www.ien.com/product-development/article/20995123/xray-cooling-in-industrial-scanners>

Eléctrica, R. (Marzo de 2017). *Metodología para el cálculo del inventario de emisiones de gases de efecto invernadero de red eléctrica de España, SAU*. ree.es.

Fraunhofer-Gesellschaft. (12 de Julio de 2012). *Science Daily*. Obtenido de <https://www.sciencedaily.com/releases/2012/07/120712111713.htm>

García, A. (19 de Mayo de 2017). *ADSL ZONE*. Obtenido de *¿Cuánto consume cada componente del ordenador?*: <https://www.adslzone.net/2017/05/19/cuanto-consume-cada-componente-del-ordenador/>

Gento. (31 de Octubre de 2017). *Raritan*. Obtenido de <https://www.raritan.com/ap/blog/detail/types-of-data-center-cooling-techniques>

Gorbounov, P., Battistin, M., & Thomas, E. (Abril de 2016). *Comparison of liquid coolants suitable for single-phase detector cooling*. Obtenido de TWIKI CERN: https://twiki.cern.ch/twiki/pub/LHCb/C6K/Coolants_review.pdf

Heath, N. (13 de Marzo de 2014). *TechRepublic*. Obtenido de *How IBM's Node-RED is hacking together the internet of things*: <https://www.techrepublic.com/article/node-red/>

Hernández, L. d. (Abril de 2020). *Programar fácil*. Obtenido de <https://programarfácil.com/blog/arduino-blog/ds18b20-sensor-temperatura-arduino/>

Hernández, L. d. (Mayo de 2020). *Programar Fácil*. Obtenido de <https://programarfácil.com/esp8266/mqtt-esp8266-raspberry-pi/>

Information, N. C. (112 de Marzo de 2020). *PubChem Database*. Obtenido de CID=2782408: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/#query=Perfluoro_2-methyl-3-pentanone_

Integrated, M. (Julio de 2019). *Maxim Integrated*. Obtenido de <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>

Intel. (12 de Marzo de 2020). *Intel*. Obtenido de Intel® Turbo Boost Technology 2.0: <https://www.intel.com/content/www/us/en/architecture-and-technology/turbo-boost/turbo-boost-technology.html>

Iwai, H. (2009). *Roadmap for 22 nm and beyond. Microelectronic Engineering Vol.86 Num 7-9*, 1520-1528.

Leidenfrost, J. G. (Noviembre 1966). *On the fixation of water in diverse fire. International Journal of Heat and Mass Transfer Vol 9 Issue 11*, 1153-1166.

Liu, Y., & Dick, R. (Julio de 2007). *Electrical, computer & energy engineering - University of Colorado*. Obtenido de Accurate Temperature-Dependent Integrated Circuit Leakage Power Estimation is Easy: <http://ecee.colorado.edu/~shangl/papers/liu07mar.pdf>

Marín Herrero, J. M. (2020). *Práctica docente de refrigeración electrónica con una Raspberry Pi 3 B+/4*. Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza: Área de máquinas y motores térmicos.

Marín, J. M., Monné, C., & Uche, J. (2007). *Transferencia de Calor*. Zaragoza: Área de máquinas y motores térmicos- Universidad de Zaragoza.

Moore, D. G. (1965). *Cramming more components into integrated circuits. Electronics Vol.38 Num.8*, 114.

Mosquitto. (Mayo de 2020). Obtenido de Eclipse Mosquitto: <https://mosquitto.org/>

Newsroom, A. S. (30 de Enero de 2020). *AsianScientist*. Obtenido de <https://www.asianscientist.com/2020/01/print/the-cost-of-cooling/>

Pi, R. (Mayo de 2020). *Raspberry Pi- FAQs*. Obtenido de <https://www.raspberrypi.org/documentation/faqs/>

Piltch, A. (14 de Noviembre de 2019). *Raspberry Pi 4 Review*. Obtenido de Tom's hardware: <https://www.tomshardware.com/reviews/raspberry-pi-4-b,6193.html>

PubChem, N. C. (112 de Marzo de 2020). *PubChem Database*. Obtenido de CID=2782408: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/#query=Perfluoro_2-methyl-3-pentanone_

Raspberry Pi 4. (Junio de 2019). Obtenido de *Raspberry Pi*: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-4-model-b/specifications/>

RaspberryPi. (Junio de 2019). *Raspberry Pi 4*. Obtenido de *Raspberry Pi*: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-4-model-b/specifications/>

Selectra. (Marzo de 2020). *Tarifa Luz hora*. Obtenido de <https://tarifaluzhora.es/info/precio-kwh>

Simmons, R. E. (1 de Mayo de 1996). *Electronic Coolings*. Obtenido de <https://www.electronics-cooling.com/1996/05/direct-liquid-immersion-cooling-for-high-power-density-microelectronics/>

Bibliografía

Uhlmann, E., Röhner, M., & Langmack, M. (2010). *Micro-Manufacturing Engineering and Technology*. En Y. Qin, *Chapter 3 - Micro-EDM* (págs. 39-58). Oxford (UK): William Andrew Publishing.

Wolper, D., & Ampadu, P. (2012). *Chapter 18: The Role of Temperature in Electronic Design*. In *Managing Temperature Effects in Nanoscale Adaptive Systems*. En D. Wolper, & P. Ampadu, *Managing Temperature Effects in Nanoscale Adaptive Systems* (págs. 1-13). New York: Springer.

YCharts. (Marzo de 2020). Obtenido de *Spain long term interest rates*: https://ycharts.com/indicators/spain_long_term_interest_rates

Zuber, N. (1959). *Hydrodynamic Aspects Of Boiling Heat Transfer (Thesis)*. Los Angeles: University of California.

Zaragoza, a 23 de junio de 2020



Firmado: Victoria Eugenia Englert González

